



**YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLTİLİ BİR ZEMİNİN ALKALİ  
AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL VE POLİPROPİLEN  
LİF KARIŞIMI İLE STABİLİZASYONU**

**Dilek AKBAŞ**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU  
2023  
(Her Hakkı Saklıdır)**

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

**YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLTİLİ BİR ZEMİNİN ALKALİ AKTİFLEŞTİRİLMİŞ  
UÇUCU KÜL VE POLİPROPİLEN LİF KARIŞIMI İLE STABİLİZASYONU**

(Investigation of Some Static and Dynamic Properties of a Cohesive Floor Stabilized with  
Geopolymer Binder and Fiber Reinforcement Mixtures)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilek AKBAŞ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

Bayburt  
Haziran, 2023

## KABUL VE ONAY TUTANAĐI

Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU danışmanlığında, 202202018 numaralı Dilek AKBAŞ tarafından hazırlanan “Yüksek Plastisiteli Siltli Bir Zeminin Alkali Aktifleştirilmiş Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Karışımı İle Stabilizasyonu” adlı bu çalışma 05.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim 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.

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

Doç. Dr. Murat KUL

Enstitü Müdürü

## ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “*Yüksek Plastisiteli Siltli Bir Zeminin Alkali Aktifleştirilmiş Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Karışımı İle Stabilizasyonu*” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20....

Dilek AKBAŞ

## TEŞEKKÜR

“Yüksek Plastisiteli Siltli Bir Zeminin Alkali Aktifleştirilmiş Uçucu Kül ve Polipropilen Lif Karışımı İle Stabilizasyonu” isimli yüksek lisans çalışması Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim 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 Emine KURUCU, Kutluhan KURUCU ve KURUCU ailesine 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 Şengül AKBAŞ ve sevgili babam Cihan AKBAŞ' a, değerli kardeşlerim Enes AKBAŞ, Taha AKBAŞ ve Ceren AKBAŞ' a en içten şükranlarımı sunarım.

## ÖZ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLTİLİ BİR ZEMİNİN ALKALİ AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL VE POLİPROPİLEN LİF KARIŞIMI İLE STABİLİZASYONU

Dilek AKBAŞ

Haziran 2023, 69 Sayfa

Beton teknolojilerini konu alan çalışmalarda alkali ile aktifleştirilen malzemelerin geleneksel bağlayıcılara bir alternatif olabileceğinin belirlenmesinin akabinde, bu malzemelerin zemin iyileştirme uygulamalarında stabilizasyon ajanı olarak kullanımı araştırılmaya başlanmıştır. Uygulama kökeninin beton teknolojisine dayalı olması bazı uygulamaların geoteknik alana yansımaya neden olmuştur. İşlenebilirlik, çalışmalarda dikkate alınan beton özelliklerini etkileyen hayati parametrelerden biridir. Ancak zemin stabilizasyonu uygulamalarında kullanılan harcın kıvamı betona göre çok daha düşüktür. Bu nedenle, gözenek boyutunu azaltmak için stabilize edilmiş zeminlere sıkıştırma uygulanır. Bu durumda zemin stabilizasyonu uygulamasında işlenebilirlikten çok nem içeriği ön plana çıkmaktadır. Alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler kullanılarak zemin stabilizasyonu üzerine yapılan çoğu çalışma, Si/Al, Na/Al, Si/Ca veya SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini dikkate almaktadır. Ancak işlenebilirlik, sıkıştırılarak yerleştirilmesi gereken bir harç için dikkate alınabilecek bir parametre değildir. Fiber katkı ile zemin stabilizasyonu zeminin çoklu mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Birden fazla farklı özellikteki lifin malzeme içerisinde kullanımı matristeki her bir lifin olumlu yönlerinin aynı malzeme içerisinde ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Hibrit elyaf karışımlarını farklı yapısal özellikler, farklı işlevler ve farklı uzunluklar olmak üzere üç farklı şekilde kullanmak mümkündür. Geoteknik mühendisliğinde hibrit liflerin zemin iyileştirme uygulamalarında kullanımını konu olan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma, siltli zeminin alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül ve 3 mm-12 mm uzunluktaki elyaf ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Bu çalışmanın amaçları, (1) aktivatör içeriğinin ve uçucu kül içeriğinin, stabilize edilmiş numunelerin serbest basınç dayanımı, Al/Si oranı ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı üzerindeki etkisini istatistiksel bir yaklaşım kullanarak incelemek, (2) Uzunlukça hibrit polipropilen lif katkısının serbest basınç dayanımı, gerilme-şekil değiştirme davranışı, göçme anında şekil değiştirme ve sekant modülü üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Uçucu kül içeriği, alkali aktivatör içeriği ve serbest basınç dayanımı değeri arasındaki ilişkiyi araştırmak için istatistiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Söz konusu parametreler, istatistiksel model yardımı ile optimize edilmiştir. Stabilize edilmiş zemin, bünyesindeki geopolimer yapıları incelemek için karakterize edilmiştir. Uçucu kül ve alkali aktivatör içeriğinin serbest basınç dayanımı, Al/Si ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları üzerindeki etkileri türetilen istatistiksel model yardımı ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonucu, kompaksiyonda çok önemli rol oynayan aktivatör içeriğinin serbest basınç dayanımı değerini en az Si/Al ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları kadar etkileyen bir parametre olduğunu göstermiştir. Ek olarak, hibrit lif uzunluğunun kullanılarak, stabilize edilmiş zeminin çoklu mekanik özellikleri iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, alkali aktif bağlayıcı, uçucu kül, uzunlukça hibrit lif.

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

#### **STABILIZATION OF A HIGH PLASTICITY SILTY SOIL WITH A MIXTURE OF ALKALINE ACTIVATED FLY ASH AND POLYPROPYLENE FIBER**

**Dilek AKBAŞ**

**June 2023, 69 Pages**

Following the determination that alkali-activated materials may be an alternative to conventional binders in concrete studies, the use of these materials as stabilization agents in soil improvement applications began to be investigated. The fact that the study is based on concrete technology has caused some applications to be reflected in the geotechnical field. Workability is one of the vital parameters affecting concrete properties, which is considered in the studies. However, the consistency of the mortar used in soil stabilization applications is much lower than concrete. Therefore, compaction is applied to the stabilized soils to reduce pore size. In this case, moisture content becomes prominent for soil stabilization application instead of workability. Most studies on soil stabilization using alkali-activated materials examined the effects of the molar ratio of Si/Al, Na/Al, Si/Ca, or SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O on workability. However, workability is not a parameter that can be considered for a mortar required to be placed by compaction. Using fiber inclusion is a common method to improve engineering properties of stabilized soil. The use of hybrid fiber, obtained by mixing more than one fiber into the material, leads to the positive aspects of each fiber in the matrix. In this way, multiple properties of the composite material can be improved simultaneously. However, use of hybrid fiber in soil stabilization applications is very rare. It is possible to use hybrid fiber mixtures in three different ways. These can be classified as using fibers with different structural properties, different functions, and different lengths. This study investigated the stabilization of silty soil with alkali-activated fly ash and fiber with 3 mm and 12 mm lengths. The objectives of this paper are (1) to examine the effect of activator content and fly ash content on the UCS, Al/Si ratio, and SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio of the stabilized samples using a statistical approach, (2) to investigate the effect of hybrid fiber length on UCS, secant modulus, and stress-strain characteristics of the stabilized soil. A statistical approach was employed to investigate the relationship between fly ash content, alkali activator content, and UCS value. The fly ash content and alkali activator content were optimized considering the statistical model. The stabilized soil was characterized to examine geopolymer structures. The effects of fly ash and alkali activator content on UCS, Al/Si, and SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratios were determined considering the derived statistical model. The study showed that the activator content, which plays a crucial role in compaction, is a parameter that affects the UCS value at least as much as the Si/Al and SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratios. Additionally, using hybrid fiber length improved the multiple mechanic properties of the stabilized soil.

**Keywords:** Soil stabilization, alkali activated binder, fly ash, hybrid fiber length.

## İÇİNDEKİLER

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI.....       | i    |
| TEŞEKKÜR.....                       | ii   |
| ÖZ .....                            | iii  |
| ABSTRACT .....                      | iv   |
| İÇİNDEKİLER.....                    | v    |
| TABLolar DİZİNİ.....                | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                | ix   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xi   |

### BİRİNCİ BÖLÜM

|                |   |
|----------------|---|
| 1. Giriş ..... | 1 |
|----------------|---|

### İKİNCİ BÖLÜM

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Kaynak Özetleri.....                                        | 4  |
| 2.1.1. Zemin Stabilizasyonu.....                                 | 4  |
| 2.1.2. Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri.....                      | 6  |
| 2.1.2.1. Yüzeysel zemin stabilizasyonu ve yöntemleri. ....       | 10 |
| 2.1.2.1.1. Katkısız stabilizasyon. ....                          | 11 |
| 2.1.2.1.1.1. Kompaksiyon yöntemi.....                            | 11 |
| 2.1.2.1.1.2. Drenaj yöntemi. ....                                | 14 |
| 2.1.2.1.2. Katkılı stabilizasyon.....                            | 14 |
| 2.1.2.1.2.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu.....                 | 14 |
| 2.1.2.1.2.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu.....               | 17 |
| 2.1.2.1.2.3. Kullanılmış lastikler ile zemin stabilizasyonu..... | 17 |
| 2.1.2.1.2.4. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. ....            | 19 |
| 2.1.3. Geopolimer.....                                           | 22 |
| 2.1.3.1. Geopolimerlerin kimyası.....                            | 23 |
| 2.1.3.2. Geopolimerlerin alkali aktivasyonu. ....                | 25 |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 2.1.3.3. Geopolimerlerin uygulama alanları..... | 26 |
| 2.1.4. Alkali Aktivatörler.....                 | 27 |
| 2.1.4.1. Sodyum hidroksit. ....                 | 27 |
| 2.1.4.2. Sodyum silikat.....                    | 28 |
| 2.1.4.3. Sodyum karbonat. ....                  | 28 |
| 2.1.5. Fiberler (Elyaf lar).....                | 29 |
| 2.1.5.1. Mikro sentetik fiber donatıları. ....  | 29 |
| 2.1.5.2. Makro sentetik fiber donatıları.....   | 30 |

### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1. Materyal ve Yöntem.....</b>                             | <b>32</b> |
| 3.1.1. Doğal Malzeme.....                                       | 32        |
| 3.1.2. Uçucu Kül.....                                           | 33        |
| 3.1.3. Alkali Aktivatör .....                                   | 36        |
| 3.1.4. Fiber Donatı.....                                        | 36        |
| 3.1.5. Numune Hazırlama.....                                    | 37        |
| 3.1.6. Serbest Basınç Dayanımı Deneyi .....                     | 38        |
| 3.1.7. X-ışını Difraktometresi (XRD) Deneyi .....               | 38        |
| 3.1.8. X-ışını Floresans (XRF) Deneyi.....                      | 39        |
| 3.1.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ..... | 39        |

### DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1. Araştırma Bulguları.....</b>                                                                   | <b>40</b> |
| 4.1.1. İstatistiksel Yaklaşım ile Deney Tasarımı.....                                                  | 40        |
| 4.1.2. Serbest Basınç Dayanımına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi.....                             | 43        |
| 4.1.2.1. Aktivatör içeriğinin etkisi. ....                                                             | 44        |
| 4.1.2.2. Uçucu kül içeriğinin etkisi. ....                                                             | 46        |
| 4.1.2.3. NaOH/Na <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> oranının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi..... | 49        |
| 4.1.3. Optimum Katkı Oranı ile Hazırlanmış Numunenin karakterizasyonu. ....                            | 52        |

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.3.1. 3 mm uzunluğundaki lif katkısının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi. ....             | 54        |
| 4.1.3.2. 12 mm uzunluğundaki lif katkısının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi. ....            | 56        |
| 4.1.3.3. 3mm-12mm uzunluğundaki lif kombinasyonlarının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi. .... | 58        |
| <b>Sonuçlar ve Öneriler .....</b>                                                                               | <b>62</b> |
| <b>Kaynakça.....</b>                                                                                            | <b>64</b> |
| <b>Öz geçmiş.....</b>                                                                                           | <b>69</b> |



## TABLolar DİZİNİ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. <i>Zemin İyileştirme Yöntemleri</i> .....                                                                      | 7  |
| Tablo 2. <i>Zemin Bileşenlerine Göre Uygulanan Stabilizasyon Yöntemleri</i> .....                                       | 8  |
| Tablo 3. <i>Yol Dolguları İçin Stabilizasyon Yöntemleri</i> .....                                                       | 9  |
| Tablo 4. <i>Sıkıştırma Gereçlerinin Genel Karakteristik Özellikleri</i> .....                                           | 13 |
| Tablo 5. <i>Zemin Cinsine Göre Yaklaşık Kireç Miktarı</i> .....                                                         | 16 |
| Tablo 6. <i>Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Miktarı</i> .....                                                     | 17 |
| Tablo 7. <i>Atık Lastiklerin Mekanik Özellikleri</i> .....                                                              | 18 |
| Tablo 8. <i>Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri</i> .....                                                               | 21 |
| Tablo 9. <i>Uçucu Küllerin Sağlaması Gereken Fiziksel Değerleri</i> .....                                               | 21 |
| Tablo 10. <i>Alkali Aktivasyon Tarihsel Gelişimi</i> .....                                                              | 26 |
| Tablo 11. <i>Sodyum Hidroksitin Kimyasal Kompozisyonu</i> .....                                                         | 28 |
| Tablo 12. <i>Sodyum Silikatın Kimyasal Kompozisyonu</i> .....                                                           | 28 |
| Tablo 13. <i>Sodyum Karbonatın Kimyasal Kompozisyonu</i> .....                                                          | 28 |
| Tablo 14. <i>Çalışmada Yapılan Deneyler ve Standartları</i> .....                                                       | 32 |
| Tablo 15. <i>Doğal Zeminin Mühendislik Özellikleri</i> .....                                                            | 32 |
| Tablo 16. <i>Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri</i> .....                                                                 | 33 |
| Tablo 17. <i>Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşenleri</i> .....                                                              | 34 |
| Tablo 18. <i>Uçucu Küllerin Standartlara Göre Kimyasal Değerleri</i> .....                                              | 34 |
| Tablo 19. <i>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler</i> .....                        | 36 |
| Tablo 20. <i>Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatıların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri</i> .....                     | 36 |
| Tablo 21. <i>Uçucu Külün XRF Deneyi ile Belirlenen Oksit Bileşik İçeriği</i> .....                                      | 39 |
| Tablo 22. <i>Regresyon Analizinde Dikkate Alınan Deney Tasarımı</i> .....                                               | 40 |
| Tablo 23. <i>Deney Tasarımında Kullanılan Bağımsız Değişkenlerin Alt, Üst, Orta ve Ara Değerleri</i> .....              | 42 |
| Tablo 24. <i>Elde Edilen Regresyon Modeline Ait Veriler ve Varyans Analizi (ANOVA) (<math>\lambda=0.2</math>)</i> ..... | 42 |
| Tablo 25. <i>Farklı Aktivatör İçerikleri İçin Elde Edilmiş Olan Serbest Basınç Dayanımı Değerleri</i> .....             | 49 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Artan su içeriği ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi .....                                                                                                                                           | 13 |
| Şekil 2. Geopolimer oluşumunun şematik diyagramı.....                                                                                                                                                               | 22 |
| Şekil 3. Davidovits zincir yapı modeli.....                                                                                                                                                                         | 24 |
| Şekil 4. Mikro sentetik fiber donatı .....                                                                                                                                                                          | 30 |
| Şekil 5. Makro sentetik fiber donatı .....                                                                                                                                                                          | 31 |
| Şekil 6. Doğal zeminin tane boyutu dağılımı eğrisi.....                                                                                                                                                             | 33 |
| Şekil 7. Mikro sentetik fiber donatı. a) 3 mm, b) 12 mm .....                                                                                                                                                       | 37 |
| Şekil 8. Tek eksenli basınç deneyine ait numune örnekleri.....                                                                                                                                                      | 38 |
| Şekil 9. Regresyon analizi sonucunda oluşturulan modele ait (a) serbest basınç dayanımının 3 boyutlu yüzey grafiği, (b) kontur çizgileri grafiği.....                                                               | 43 |
| Şekil 10. (a) Farklı aktivatör içerikleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı değişimi. ....                                        | 45 |
| Şekil 11. (a) $X_2=0.1$ için farklı uçucu kül içerikleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı değişimi. ....                         | 47 |
| Şekil 12. (a) $X_2=0.3$ için farklı uçucu kül içerikleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı değişimi. ....                         | 49 |
| Şekil 13. $X_1=0.75$ , $X_2=0.3$ için farklı $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ yüzdeleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı değişimi. .... | 51 |
| Şekil 14. Tek eksenli basınç deneyi sonrası farklı aktivatör oranları için elde edilen yük-deplasman eğrileri.....                                                                                                  | 52 |
| Şekil 15. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelere ait XRD desenleri (a) zemin numunesi, (b) Uçucu kül. ....                                                                                                       | 53 |
| Şekil 16. Zemin, uçucu kül ve iyileştirilmiş zemine ait XRD kırınimleri. ....                                                                                                                                       | 53 |
| Şekil 17. Zemin, uçucu kül ve iyileştirilmiş zemine ait XRD kırınimleri. ....                                                                                                                                       | 54 |
| Şekil 18. 3 mm uzunluğundaki lif katkısının (a) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi.....      | 56 |
| Şekil 19. 12 mm uzunluğundaki lif katkısının (a) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi.....     | 57 |
| Şekil 20. (a) Geopolimer katkı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü, (b) geopolimer katkı ve 3 mm uzunluğundaki donatı karışımı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü,                       |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| (c) geopolimer katkı ve 12 mm uzunluğundaki donatı karışımı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü .....                                                                                                                                 | 58 |
| Şekil 21. Uzunlukça hibrit lif katkısının (a) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi, (d) sekant modülü üzerindeki etkisi. .... | 61 |



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

### Simgeler

|           |                                            |
|-----------|--------------------------------------------|
| UCS       | : Numunelerin Serbest Basınç Mukavemetleri |
| X1        | : Uçucu Kül İçeriği                        |
| X2        | : Aktivatör İçeriği                        |
| 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               |
| USCS | : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması Sistem |
| XRD  | : X-ışını Difraktometresi Deneyi                |
| XRF  | : X-ışını Floresans Deneyi                      |
| FTIR | : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi   |

## BİRİNCİ BÖLÜM

### 1. Giriş

Yapılaşmaya uygun olmayan arazileri geoteknik açıdan istenilen kalitede olması için birçok zemin iyileştirme yöntemi bulunmuştur. Artan yapı yükleri, deprem ve doğal afetlerin sonuçları zemin yapısının önemini ortaya koymuştur. Bu nedenle zemin stabilizasyonunda yeni yöntemler geliştirilmeye devam etmektedir. Geliştirilen yeni yöntemler sayesinde yapının kullanım ömrü uzamakta, deprem ve doğal afetlere karşı direnç kazanmakta ve yeni inşa edilecek yapılar için uygun zeminler elde edilmektedir. Aşırı oturma, sıvılaşma, çökme gibi zemin taşıma gücü yeterli olmayan zeminlerde geliştirilen yeni yöntemler önemli ölçüde fayda sağlamaktadır (Akyüz, 2009).

Taşıma gücü yetersiz olan zeminlerin üzerine yapılacak olan yapıların güvenliği ve kullanım ömrü için elverişsiz olan zeminin kazılıp yerine taşıma gücü yüksek, sıkı olan bir malzeme yerleştirilip sıkıştırılması maliyetli ve zaman alıcı bir yöntemdir. Bu işlemin maliyetinin yüksek olmasından dolayı geoteknik mühendisleri alternatif yöntemler araştırmışlardır (Öntürk, 2011). Bu alternatif yöntemlerden biri de katkı malzemeleri kullanarak zeminin taşıma gücünü olduğundan daha yüksek duruma getirmektir. Zemini katkı malzemeleri ile güçlendirirken en çok endüstriyel atık malzemeleri kullanılmaktadır (Çetin, 2011).

Mühendislik özellikleri zayıf olan zemine uygun özellikte katkı malzemeleri katarak, zeminin özelliklerini iyileştirme maliyet ve zaman açısından tasarruf sağladığından son zamanlarda tercih edilen yöntemlerdendir. Zemin iyileştirmede birçok malzemenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunlardan bazıları doğal yöntemlerle, bazıları ise endüstri ürünü ve endüstri atığı olarak elde edilmektedir (Çetin, 2011).

Kohezyonlu zeminlerde stabilizasyon problemleri ile sürekli karşılaşılmaktadır. Bu tür zeminlerin özelliklerini kontrol altına almak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan en ekonomik olanı kimyasal katkı kullanarak yapılan iyileştirmelerdir. Kimyasal katkı olarak kireç, çimento, uçucu kül ve bitüm gibi malzemeler çoğunlukla tercih edilmektedir (Bekar, 2020). Her geçen gün inşa edilen yapıların artışı ile farklı malzemelerin kullanımı da artış göstermektedir. Bu çeşitlilik ise enerjinin fazla kullanımına sebep olmaktadır. Yüksek miktarda malzeme ve enerji ihtiyacı atıkların oluşmasını, çevre problemlerini de beraberinde getirmektedir. Dünyada ve ülkemizde, oluşan atık maddelerin kompozit malzeme olarak zemin iyileştirmede kullanılabilmesi için yeni malzeme araştırmaları giderek artmaktadır (Tülek, 2007).

Zemin stabilizasyonunda kullanılan doğal malzeme kaynaklarının azalması ve bu malzemelerin elde edilmesi ekonomik olarak problem oluşturmaktadır. Bu nedenle atık malzemelerin yeniden kullanılabilmesi hem ekonomik açıdan hem de çevre kirliliği açısından fayda sağlayacaktır (Tülek, 2007).

Elektrik enerjisi üretiminde termik santraller ve barajlar en önemli üretim kaynaklarıdır. Türkiye’de ise elektrik enerjisinin üretiminin yarısından fazlası termik santrallerden elde edilmektedir (Öksüz, 2006).

Öğütülerek toz haline getirilmiş olan düşük kalorili pulverize kömürlerin yakıt olarak kullanılması ile termik santrallerden elektrik enerjisi sağlanmaktadır. (Termik santrallerde enerji üretimi için toz kadar çok ince öğütülmüş düşük kalorili kömür kullanılmaktadır.) Bu enerji üretim sisteminin baca kısmında ince kül parçacıkları gazlarla birlikte yukarı doğru hareket etmektedir. Bu ince kül parçacıklarının dışarıya çıkmasına filtreler ve silikonlar engel olmaktadır. Bu termik santrallerden çok ince yapıda olan uçucu kül elde edilir (Öksüz, 2006).

Taşınmasında ve depolamasında problem oluşturan uçucu küller, su ile karıştırılıp kül barajlarına iletilmekte veya kuru bir şekilde atık depolarına gönderilmektedir. Her iki yöntemde de çevre kirliliği problemine neden olabilmektedir. Ülkemizde yüksek miktarda elde edilen uçucu küllerin depolanmasında ve taşınmasında enerji harcanmaktadır. Bu uçucu küllerin zemin iyileştirmede alternatif malzeme olarak kullanılması çevre ve ekonomi açısından fayda sağlayacaktır (Öksüz, 2006).

En önemli bağlayıcı malzeme olan çimento, enerji tüketiminde büyük bir paya sahiptir. Çimento üretiminde kullanılan enerji miktarının fazla olması ve CO<sub>2</sub> salınımının fazla olması göz önüne alındığında, çimentoya yerine kullanılabilecek alternatif malzemelerin araştırılması önem kazanmıştır (Bekar, 2020).

Uçucu kül, beton üretiminde çimento yerine kullanılabilmektedir. Aynı zamanda uçucu külün çimentoya göre daha ucuz olması, çimento yerine kullanımında tasarruf sağlamaktadır. Uçucu kül sayesinde beton, mekanik ve kimyasal olarak daha iyi özelliklere sahip olmaktadır (Öksüz, 2006).

Yapılan araştırmalar incelendiğinde uçucu külün, geoteknik çalışmalarda ve yapı malzemesinde kullanılabilir nitelikte bir malzeme olduğu, malzeme özelliklerini iyileştirdiği ve tasarruf sağladığı gözlenmiştir. Termik santral atığı olarak elde edilen uçucu külün ülkemizde de inşaat endüstrisinde kullanımı çevre kirliliğinin azalmasını ve ekonomik sonuçlar vermesini sağlayacaktır.

İlk defa 1951’ de Box ve Wilson tarafından geliştirilen yanıt yüzey yöntemi ile kimyasal tepkimelerin istenilen seviyede optimizasyonun sağlanması amaçlanmıştır. Yanıt yüzey yöntemi ile yapılacak olan denemelerin tasarımını sağlamada, elde edilen verilerin beklenen sonuçlara olan tesirinin matematiksel model yardımıyla belirlenmesini ve verilerin optimize edilmesini sağlamada kullanır. Yanıt yüzey yöntemi, matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla tasarım kademelerinin yol almasını ve optimizasyonunu sağlama işlemi olarak tanımlanabilmektedir (Arslan, 2020).

Yanıt yüzey yöntemi, herhangi bir deneyin ya da sistemin, ilerlemesini, iyileşmesini ve optimize edilmesini sağlamak için matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin birlikte kullanılmasıdır. Yanıt yüzey yönteminin sağladığı en önemli fayda, çok sayıdaki verilerin değerlendirilmesi için uygulanacak olan deneylerin sayısını azaltmasıdır (Taşdemir, 2020).

Yanıt yüzey yöntemi, süreci etkileyen veriler arasında bağlantı olup olmadığını, bağlantı olduğu durumda hangi etkinin daha baskın geldiğini, işlemin optimizasyon parametrelerinden hangisine daha hassasiyet gösterdiğini ve bu faydalarından dolayı her alanda çoğunlukla kullanılan yöntemdir (Türkyılmaz, 2011).

Yanıt yüzey yönteminde iki değişken arasındaki bağlantının tayin edilmesi sağlanmaktadır. Çalışmada tesiri analiz edilen etkenler bağımsız değişkenler, optimizasyonu sağlanacak olan tepkiler ise bağımlı değişkenler olarak ifade edilmektedir. Yöntem az sayıda yapılan deney sayesinde dikkate değer bilgi vermektedir. Ayrıca bağımlı değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini matematiksel denklem tasarımlarıyla analizi sağlanabilmektedir (Balçıkanlı, 2016).

Deneylerin tasarlanmasında, modellerin elde edilmesinde, çeşitli etkenlerin tesirlerin incelenmesinde ve beklenen yanıtlar için uygun şartların bulunmasında kullanılan yanıt yüzey yöntemi deneysel tasarım, matematiksel modelleme ve model onayı olmak üzere 3 aşamada meydana gelmektedir. İlk aşamada deneysel tasarım yapılırken minimum ve maksimum parametre değerleri belirlenir ve optimize edilmesi için ara değerler oluşturularak deneysel program meydana getirilir. Bu programda oluşturulan tüm tasarımlar için sonuç değerleri belirtilir, parametre ve sonuçlar arasındaki bağlantı kurulur (Masike, 2019).

## İKİNCİ BÖLÜM

### 2.1. Kaynak Özetleri

Zeminlerde kullanılmakta olan stabilizasyon metotları ve yapılan literatür çalışmalarına bu kısımda yer verilmiştir.

#### 2.1.1. Zemin Stabilizasyonu

Zeminler hem yapıların inşasında malzeme olarak hem de inşa edilecek olan yapının altında taşıyıcı tabaka olarak rol üstlenmektedir. Zeminler mühendislik özelliklerinden ve arazi şartlarından dolayı farklı özelliklere sahiptir. İnşaatı planlanan yapıların arazileri bazen uygun koşullarda olmayabilir. Bu arazilerin tamamen kaldırılıp yerine istenilen özelliklere sahip zeminlerin kullanılması ekonomik ve uygulanabilirlik açısından genellikle mümkün değildir. Bu nedenle arazide elverişli olmayan zemin tabakaları uygun iyileştirme yöntemleri ile istenilen duruma getirilebilmektedir (Tumluer, 2006).

Yapı kullanım ömrü ve güvenliği, yapının üzerine inşa edilen zemin tabakasının özellikleri ile ilişkili olduğu için dikkat edilmesi gereken unsurdur. Çevresel etkenlerin ve iklim şartlarının olumsuz etkilerinden dolayı oluşan gerilmeler, zeminin taşıma gücünde azalmalar meydana getirebilmektedir. Ayrıca zemin, yapı elamanlarının ağırlıkları ve sonradan meydana gelebilecek yüklere karşı direnç gösterebilmelidir. Bu nedenle yapılar mühendislik özellikleri elverişli zeminler üzerine inşa edilmelidir (Tandoğan, 2021).

Planlanan bir mühendislik projesinin uygulama yapılacağı alanın zemin parametreleri önemli etkiye sahiptir (Balatan, 2019). Günümüzde gerçekleştirilen mühendislik projelerinin güvenli ve ekonomik olması için inşası gerçekleştirilecek olan yapıların arazilerinin jeoteknik ve jeolojik açıdan incelenmesi gerekmektedir. İncelenen zeminlerin taşıma gücü, şişme, sıvılaşma, oturma ve şev durabilitesi parametreleri araştırılmalıdır (Küçükali, 2011). Geoteknik mühendisleri tarafından uygulamanın proje aşamasında, zeminin mühendislik özellikleri ve daha sonra yapının imalatından sonraki zeminin davranışı araştırılır. İncelenen zemin elverişsiz olduğu durumda ekonomik ve uygulanabilir yöntemlerle yerinde zemin iyileştirilmesi yapılır (Balatan, 2019).

Proje sahasının zemini istenilen geoteknik özelliklere sahip olmadığı durumda, zeminin tamamen ortadan kaldırılması ekonomik açıdan uygun olmadığından ilk olarak yerinde iyileştirme yapılır (Balatan, 2019). Kullanılan iyileştirme yöntemleri sayesinde yeterli olmayan taşıma gücü artırılarak, oluşan yapı yüklerini karşılayabilmektedir (Küçükali, 2011).

Bu iyileştirme yöntemlerinde öncelikli olarak mekanik yöntemlerle zemin boşlukları azaltmayı, boşlukların uygun malzemelerle doldurmayı, yeraltı su seviyesinin düşürülüp zeminin su içeriğinin azaltılması ve organik, endüstriyel atıklarla zeminde kayma dayanımının arttırılması hedeflenmektedir (Balatan, 2019).

Artan nüfusla yapıların kat sayısının artması ve boyutlarındaki büyümeler, yapıların taşıma gücü yüksek zeminlere inşa edilmesini gerekli kılmaktadır (Ayan, 2021). Artan şehirleşme ile beraber, uygulanacak mühendislik yapılarına uygun yerleşim yerlerinin azalmasından dolayı zemin iyileştirme çalışmaları önemli hale gelmiştir. Zemin stabilizasyon yöntemlerinin gelişmesinde, artan yapılaşma ile azalan uygun yerleşim alanları, yapının kendisini ve çevre yapılarını güvenli hale getirme, artan yapı boyutlarından oluşan gerilmeler gibi etkenler katkıda bulunmuştur (Balatan, 2019). Bu nedenle taşıma gücü yeterli olmayan alanlarda zeminin özellikleri ıslah edilip zemini, yapıyı hizmet ömrü boyunca güvenli bir şekilde taşıyabilecek duruma getirilmelidir. Yapılan bu işleme zemin stabilizasyonu denir ve bu işlem için birçok yöntem geliştirilmiştir (Ayan, 2021).

Stabilizasyon, zeminlerin taşıma güçlerini artırmak ya da var olan taşıma güçlerinin değişken yük ve iklim etkilerinin olumsuz şartlarına, değişen hava koşullarına karşı uzun süre dayanabilecek duruma getirilmesi için, kimyasal, mekanik ve biyolojik yöntemler kullanarak elverişli hale getirilmesidir. Stabilizasyon terimi Karayolları Teknik Sözlüğünde; zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek, direncini artırmak ya da sahip olduğu direnci korumak amacıyla mekanik ve kimyasal işlemler yapılması olarak ifade edilmektedir (Şengül, 2010).

İçerisinde çok miktarda ince taneler bulunduran killi zeminler zemin çeşitlerinden biridir (Tandoğan, 2021). Bu zeminlerin mukavemetlerinin düşük olması, şişme olasılıklarının yüksek olması ve taneleri arasındaki boşlukların çok az olmasından dolayı permeabilitesinin düşük olması, konsolidasyonun da yavaş gerçekleşmesine neden olmaktadır (Kılıç, 2008). Bu sebepten bu tür zeminlerde iyileştirme yapılmaktadır (Tandoğan, 2021).

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde killi zeminlerin iyileştirilmesinde kireç, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, mermer toz atıkları, pomza taşı, tuğla tozu atıkları, kullanıldığı gözlemlenmiştir. Doğal ve yapay puzolanların kullanılması ekonomik ve zeminin mühendislik özelliklerine fayda sağladığı için kullanımı ve zemin iyileştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması artış göstermektedir (Kılıç, 2008).

Elverişsiz zeminle karşılaşılan durumlarda aşağıda verilen kararlardan bazıları uygulanmaktadır (Tandoğan, 2021);

- Uygun olmayan zemini kullanma,

- Uygun olmayan zemini tamamen atılarak yerine uygun özellikte bir zemin koyma,
- Uygun olmayan zeminin yerinde iyileştirilmesi.

Birinci kararda yapı, zemininin yetersiz özellikleri göz önünde bulundurularak, bu özelliklere karşı koyabilecek şekilde temel elemanları tasarlanmalıdır. Fakat bu durum temel yapı elemanlarının boyutlarındaki artıştan dolayı ekonomik açıdan uygun olmamaktadır. Ek olarak yapının kullanım ömrü boyunca zeminde oluşabilecek gerilmelerden dolayı yapı güvenliğinde tehlike oluşturmaktadır.

İkinci kararda, uygun olmayan zeminin kazısı yapılarak taşınması ve istenilen özellikteki zeminin araziye yerleştirilmesi hem ekonomik hem de zaman bakımından elverişsiz bir yöntemdir.

Üçüncü kararda ise zemin cinsine ve uygulamanın amacına göre farklı yöntemler kullanılarak yapılan zemin iyileştirme yöntemidir.

### **2.1.2. Zemin Stabilizasyonu Yöntemleri**

Nüfusun artmasıyla birlikte artan yapı ihtiyacından, yapı sayısı ve boyutları artmaktadır. Bu artış nedeniyle zeminlere gelen yapı yükleri de artmaktadır. Bu durum yeterli mühendislik özelliklerine sahip olmayan zeminlerin iyileştirilmesini de zorunlu kılmıştır. Yapıyı taşıyabilecek dayanıma sahip olmayan zeminlerle karşılaşıldığında yapılabilecekler, inşaat alanı değiştirmek, yeterli mühendislik özelliklerine sahip olmayan zemin tabakasını tamamen kaldırıp elverişli zemin yerleştirmek veya zemine katkı malzemeleri ilave ederek zeminin özelliklerini iyileştirmektir. Belirtilen ilk iki yöntem uygulanabilirlik ve ekonomik olarak çözüm sunmadığı için çoğunlukla tercih edilmemektedir. Son zamanlarda gelişen teknoloji ve yöntemler sayesinde zeminlerin dayanımı elverişli hale getirilerek oturma ve deprem anında sivilaşma riskini azaltmaktadır (Bozkurt, 2020).

Zemin iyileştirmede kullanılan yöntemler zemin koşullarına bağlı olarak tercih edilmektedir. Bu zemin koşullarını şu şekilde ifade edebiliriz; Zemin ortamının türü, inşa edilecek yapının türü ve yük dağılımı, iyileştirme yapılacak arazinin geometrik nitelikleri, zeminin mühendislik özellikleri, çalışan işçi ve kullanılan aletlerin durumu, çevre koşulları ve ekonomik durumdur (Bozkurt, 2020).

Mekanik ve kimyasal olarak zemin iyileştirmede iki metot vardır. Mekanik stabilizasyon; zemine katkı malzemesi eklemekten ve zemin kütleğinde kimyasal bir tepkime oluşturmaktan sıkıştırılarak fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesidir. Zemin tabakalarının karıştırılması, zeminin sıkıştırılması ile zemin tane dağılımını iyileştirerek zeminin elverişli

duruma getirilmesi işlemidir (Bozkurt, 2020). Yapılan mekanik stabilizasyon ile zeminin likit limitinde, plastisite indisinde, kapilaritesinde ve tane boyutu dağılımının derecelenmesinde azalma, dayanım ve durabilitesinde artma sağlanır (Gençoğlu, 2022). Mekanik stabilizasyon işlemine tabi tutulacak zemin, yapı imalatında ve hizmet ömrü boyunca üzerine gelen yüklerden büyük bir deformasyon oluşturmayacak özellikte olmalıdır (Dağlı, 2021).

Kimyasal stabilizasyon ise yeterli dayanıma sahip olmayan zeminlere katkı malzemeleri (kireç, uçucu kül, çimento, bitüm, pirinç kabuğu külü, polimer vb.) katarak, zemin kütlesinde kimyasal tepkime sonucunda dayanım kazandırılmasıdır (Dağlı, 2021).

Zeminde uygulanan stabilizasyon metodu, maliyet, zaman ve uygulanabilirlik etkenlerine göre zeminde belirlenen probleme, iyileştirme zeminin tabaka derinliğine ve zeminin mühendislik özelliklerine (tane boyutu dağılımı, yeraltı su seviyesi, plastisite indisi vb.) göre farklılık gösterir (Çetin, 2011).

Uygulama derinliği, zemin stabilizasyon metoduna etki eden en önemli etkenlerden birisidir. Uygulama derinliğine göre zemin stabilizasyon metotları derin zemin stabilizasyonu ve yüzeysel zemin stabilizasyonu olarak sınıflandırılır. Yüzeysel zemin stabilizasyonu katkısız iyileştirme ve katkılı iyileştirme olarak ikiye ayrılmaktadır (Bozkurt, 2020).

Zemin iyileştirme yöntemi zeminin sınıfına, tane boyutu dağılımına ve plastisite indisine göre belirlenir. Zeminin yetersiz olan özelliği tayin edildikten sonra uygun olan stabilizasyon metodu belirlenir. Bu şekilde zeminin zayıf olan özellikleri iyileştirilir. Zeminin türüne göre değişik hedefler için uygulanan stabilizasyon yöntemleri Tablo 1’de verilmiştir (Bozkurt, 2020).

Tablo 1. *Zemin İyileştirme Yöntemleri (Bozkurt, 2020)*

| Amaç                       | Zemin cinsi              | Stabilizasyon metodu                             |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| Don duyarlılığını azaltmak | Kaba granüller           | Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon |
|                            | Düşük PI killer          | Kompaksiyon, çimento, kireç                      |
|                            | Yüksek PI killer         | Kireç                                            |
|                            | İnce granüller           | Çimento, asfalt, uçucu kül                       |
| Su geçirimsizliği          | Düşük PI killer          | Çimento, kireç                                   |
|                            | Düşük PI killer          | Çimento, asfalt, kireç                           |
| Kabarma büzülme kontrolü   | Düşük PI killer          | Çimento, kompaksiyon kireç                       |
|                            | Yüksek PI killer         | Kireç                                            |
| Esnekliği azaltmak         | Yüksek PI killer         | Kireç                                            |
|                            | Elastik kil veya siltler | Çimento                                          |

Stabilizasyon yöntemini belirlerken zeminin cinsi ve özellikleri dikkate alınarak analizler yapılmalıdır. Zeminin mühendislik özelliklerine ve yapının zeminde oluşturacağı gerilmelere uygun olan yöntem seçilerek ekonomi, zaman, teknoloji bakımından avantaj sağlanabilmektedir (Bozkurt, 2020).

Tablo 2’de görüldüğü üzere seçilen zemin stabilizasyon yönteminde zeminin cinsi önemli bir etkidir. Zeminin cinsine göre belirlenen yöntemler farklılık göstermektedir. Zeminde iyileştirilmek istenen özellikler farklılık gösterdiğinden seçilen stabilizasyon yöntemi de farklıdır. Örneğin kil ve silt zeminlerde yüzeysel kuvvetler önemli tesire sahipken, killer aynı zamanda düşük permeabiliteye de sahiptir (Bozkurt, 2020).

Tablo 2. *Zemin Bileşenlerine Göre Uygulanan Stabilizasyon Yöntemleri (Bozkurt, 2020)*

| Zemin içeriği                   | Tavsiye edilen stabilizasyon                                                     | Amaç                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kum                             | Mekanik stabilizasyon<br>Çimento<br>Asfalt                                       | -İnce plastik olmayan malzeme karıştırarak stabiliteyi arttırmak<br>-Mukavemeti arttırmak<br>-Kohezyonu sağlamak                                                                                                                    |
| Silt                            | Mekanik ve kimyasal stabilizasyon                                                | -Zemin özelliklerini iyileştirmek                                                                                                                                                                                                   |
| Killer;<br>-aolinler<br>-kaolin | Kireç veya kireç- uçucu kül karışımı<br>Kum ile mekanik stabilizasyon<br>Çimento | -Mukavemeti artırarak<br>-Stabiliteyi arttırmak<br>-Kısa süreli mukavemeti arttırmak<br>-İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak<br>-Kısa süreli mukavemet artışı<br>-İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak |
| -ilit<br>-montmorillenit        | Çimento<br>Kireç                                                                 | -İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak                                                                                                                                                                                 |

Zemin stabilizasyonunda uygulanacak yöntem zeminin mühendislik özelliklerine, maliyetine, tabaka derinliğine göre değişiklik gösterebilmektedir. Uygulama farklılığından zemin stabilizasyon yöntemleri üç grupta incelenebilir (Bozkurt, 2020);

1. İnşaat aşamasında uygulanan geçici stabilizasyon yöntemleri,

Elektro osmoz, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, zeminin dondurulması işlemleridir (Kılıç, 2008).

2. Katkı malzeme kullanılmadan uygulanan kalıcı stabilizasyon yöntemleri,

Yüzey kompaksiyonu, vibro kompaksiyon, önyükleme ve patlatma ile sıkıştırma işlemleridir (Kılıç, 2008).

### 3. Katkı malzeme kullanılarak uygulanan kalıcı stabilizasyon yöntemleri

Kireç, çimento, uçucu kül, metal cüruf gibi katkı malzemelerinin zemin ile karıştırılması, ön yükleme ile düşey drenler kullanılması, enjeksiyon ve geotekstillerle iyileştirmesi, zeminin değiştirilmesi işlemleridir (Bozkurt, 2020).

Katkı malzemelerinin kullanılması ile yapılan zemin iyileştirmeleri dünyada giderek yaygınlaşmıştır. Yapılan iyileştirmeler sonrasında zeminin dayanım ve durabilitesinin yönetmeliklerdeki standartlara uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir (Dağlı, 2021).

Artan çalışmalar sayesinde zeminde kullanılacak uygun kimyasal katkıların belirlenmesi kolaylaşmıştır. Çizelgede farklı tane boyutu dağılımına ve plastisiteye sahip zeminlerin yol dolgularında yaygın olarak kullanılan kimyasal katkılarla yapılan iyileştirme yöntemleri Tablo 3’de verilmiştir (Dağlı, 2021).

Tablo 3. *Yol Dolguları İçin Stabilizasyon Yöntemleri (Dağlı, 2021)*

| Stabilizasyon Metodu    | Zemin Tipi            | İyileştirme                       | Notlar                                 |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| Katkı                   |                       |                                   |                                        |
| Portland Çimentosu      | Plastik               |                                   | Çimento hidratasyonu daha az           |
|                         | Kaba daneli           |                                   | Çimento hidratasyonu                   |
| Kireç                   | Plastik               | Kurutma                           | Hızlı                                  |
|                         |                       | Dayanım kazanımı                  | Hızlı                                  |
|                         |                       | Plastisite azalımı                | Hızlı                                  |
|                         |                       | İrileşen doku                     | Hızlı                                  |
|                         |                       | Uzun dönem puzolanik çimentolaşma | Yavaş                                  |
|                         | İnce dane içeren kaba | Plastik ile aynı                  | Plastik ince danelerin miktarına bağlı |
|                         | Non-plastik           | Yok                               | Reaktif malzeme yok                    |
| Kireç-uçucu kül         | Kireç ile aynı        | Kireç ile aynı                    | Daha geniş aralığı kapsar              |
| Kireç-çimento-uçucu kül | Kireç ile aynı        | Kireç ile aynı                    | Daha geniş aralığı kapsar              |
| Bitüm                   | Kaba                  | Su sızdırmazlığı güçlendirir      | Asfalt çimentosu veya sıvı asfalt      |
|                         | Biraz ince            | Kaba ile aynı                     | Sıvı asfalt                            |
|                         | İnce                  | Yok                               | Karıştırılmaz                          |
| Puzolanik ve cüruflar   | Siltler ve kaba       | Filler gibi davranır              | Sıkı ve güçlü                          |
|                         |                       | Danelerin çimentolaşması          | Çimentodan daha yavaş                  |

|             |         |                                     |                    |
|-------------|---------|-------------------------------------|--------------------|
| Kimyasallar | Plastik | Dayanım artışı ve hacim stabilitesi | Karıştırılması zor |
|-------------|---------|-------------------------------------|--------------------|

Değerlendirmelere göre cüruf lar ve puzolanlar tane boyutu dağılımını düzenlemek ve taneler arasında çimentolaşmayı sağlamak için siltli ve iri taneli zeminlerde kullanılırlar. Cüruf ve puzolanik malzemeler tanelerin arasını doldurarak tane boyutu dağılım derecesini artırır lar. Bu sayede zeminin boşluk oranı azalarak yoğunluğun artmasıyla zeminin özelliklerinin iyileşmesini sağlar lar (Dağlı, 2021).

Bitüm ile yapılan iyileştirmelerde ise zeminin su geçirgenliği azaltılır ve bitüm katkı malzemesi iri taneli zeminlerde tercih edilir. Bitüm katkısı ince taneli olduğu durumda sıvı asfaltta, iri taneli olduğu durumda ise sıvı asfaltta veya asfalt çimentosunda kullanılmaktadır (Dağlı, 2021).

Kireç genellikle ince taneli zeminlerde yapılan iyileştirmelerde kullanılır (Küçükali, 2011). Kireç katkı malzemesi killi zeminlerin plastisitesinin azaltması ve killi zemin taneleri ile arasında yavaş gerçekleşen çimentolaşma sayesinde zeminin mukavemeti arttırmaktadır. Kireç ile yapılan iyileştirmelerle uçucu külünde eklendiği iyileştirmelerde zeminin davranışı hemen hemen aynıdır fakat uçucu kül daha geniş aralığı kapsamaktadır. Kireç, uçucu kül ve çimento karışımı ile kireç ve uçucu kül karışımında benzer dayanım ve durabilite özellikleri görülmektedir (Dağlı, 2021).

İnce taneli zeminlerin stabilizasyonunda zeminin mühendislik özellikleri, belirlenecek stabilizör seçimini etkilemektedir. Kimyasal iyileştirmede zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılacak stabilizör seçilmeden önce verilen şu durumlar analiz edilmelidir; Zeminin kıvamı, tane boyutu dağılımı, içeriği, mineralojisi, belirlenen mühendislik nitelikleri, stabilizasyonun hedefi, dış etkenler ve mühendislik ekonomisi (Little N. Dallas, 2009).

#### **2.1.2.1. Yüzeysel zemin stabilizasyonu ve yöntemleri.**

Zeminin dayanımını artırmak için kullanılan birçok zemin iyileştirme yöntemleri ve teknolojiler geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir (Önen, 2021). Teknolojinin gelişmesiyle çeşitlilik kazanan zemin iyileştirme yöntemleri sayesinde, zemin yüzeyinden çok büyük derinliklere kadar iyileştirmeler yapılabilmektedir (Çetin, 2011). Fakat ilk olarak iyileştirilmesi gereken zayıf zemin derinliği tespit edilerek, bu derinliğe göre yapılması gereken yüzeysel ya da derin iyileştirme yöntemi belirlenmelidir (Önen, 2021).

Yüzeysel iyileştirme derin iyileştirmenin ihtiyaç duyulmadığı, üst yapı yükünün büyük olmadığı, çoğunlukla ulaştırma projelerinin imalatında kullanılan bir yöntemdir (Önen, 2021).

Demiryolu ve karayolu üst yapısından gelen yüklerin ve trafik yüklerinin etki ettiği tesviye yüzeyinin altındaki alt yapı tabakalarının dayanımını iyileştirilerek, zemine gerekli olan dayanım kazandırılır. Zeminde çok derine inmeden zeminin üst bölümünde yapılan iyileştirmeler olarak ifade edilebilmektedir (Çelik, 2020).

Zayıf zemin tabakasının ve zemin problemlerinin bulunduğu tabaka derinliğinin fazla olmadığı durumlarda kullanılan yüzeysel iyileştirme yöntemi, derin zemin iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomiktir (Önen, 2021). Bu nedenle çok sayıda yüzeysel iyileştirme yöntemleri gelişmektedir. Bu yöntemler zemine katkı malzemeleri eklenerek ya da katkı malzemesi kullanmadan yapılan iyileştirmelerdir. Bu yöntemler şu şekilde sınıflandırılabilir (Çetin, 2011).

#### **2.1.2.1.1. Katkısız stabilizasyon.**

Zeminin sahip olduğu özelliklerini iyileştirmek için zemin gradasyonunun uygun olduğu durumda zemine herhangi bir katkı malzemesi eklemekten yapılan iyileştirmeler katkısız stabilizasyon olarak ifade edilir. Katkısız stabilizasyon yöntemi iki grupta incelenir.

##### **2.1.2.1.1.1. Kompaksiyon yöntemi.**

Zeminlerin tabaka serilerek mekanik araçlar kullanılması ile sıkıştırma işlemine kompaksiyon denilmektedir. Kompaksiyon uygulaması ile zeminin maksimum kuru yoğunluğunu veren su muhtevasının bulunması hedeflenmektedir (Tuğlu, 2022).

Zemin iyileştirmede en çok uygulanan iyileştirme yöntemlerinden biri olan kompaksiyon yapı projelerinin önemli bir kısmıdır. Kompaksiyon uygulanan statik ve dinamik kuvvetlerle gerçekleşir, zamana bağlı bir uygulama değildir (Şahbaz, 2020).

Kompaksiyon yöntemi, mekanik yöntemler kullanılarak zemin taneleri arasındaki boşluklardan havanın atılması ile zemin tanelerini birbirine yaklaştırılması sonucu daha yoğun zemin elde edilmesidir. Bu yöntemin amacı oluşabilecek oturmaları engellemek, kayma mukavemetini artırmak ve geçirimsizliği azaltmaktır. Zeminin plastisitesi, su içeriği, tane boyutu dağılımı özelliklerine uygun dolgu malzemesi ocaklardan ya da arazide uygun özellikteki malzemelerden elde edilmektedir (Önen, 2021).

Kompaksiyon uygulamasında önemli bir parametre olan optimum su, zeminin en kolay sıkışabildiği su içeriğidir. Bu parametreye karşılık gelen birim hacim ağırlık değerine de maksimum kuru birim hacim ağırlığı denir (Kocabey, 2019).

Kompaksiyonu etkileyen faktör olan su içeriğinin etkileri iki farklı şekilde gözlenmektedir. Zemin doygunluk derecesinden fazla miktarda su içerdiğinde, zemin

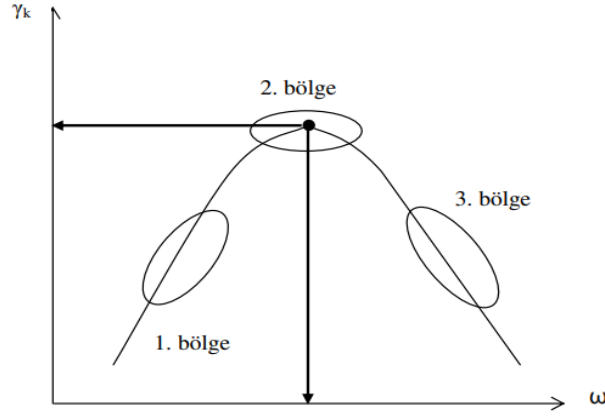
tanelerinin boşluklarında bulunan hava dışarı çıkamaz ve bu durumda hava hacminin sıkışmasıyla basınç meydana gelir. Oluşan bu basınç kompaksiyon uygulamasını zorlaştırmaktadır. Zeminin tamamen suya doymun olduğu durumda ise kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilemez. Çünkü sıkıştırma yükleri zeminin boşluk suyu basıncının artırır ve hidrostatik basınç ortaya çıkarır. Ortaya çıkan hidrostatik basınç kuvveti zemin tanelerinin birbirine yaklaşmasına engel olur (Tülek, 2007).

Kompaksiyon için etkili bir parametre olan su miktarı arttıkça tanelerin hareketi kolaylaşır fakat birbirine yaklaşması zor hale gelir. İki durumda birlikte gerçekleşebilmesi için zeminde en iyi sıkışmanın gerçekleşebildiği su miktarı optimum su miktarı olarak ifade edilir. Farklı tür zeminler için optimum su miktarları da farklıdır. Aynı zeminde kompaksiyon enerjisine göre farklılık olmaktadır. Sıkıştırmada uygulanan dinamik ve statik kuvvetlerin cinsi ve şiddeti de kompaksiyonu etkileyen parametrelerdir. Optimum su miktarı zeminin belirli kompaksiyon enerjisi altında kolay bir şekilde sıkışmasını sağlayan su miktarı olduğu için, kompaksiyon enerjisine göre farklılık göstermektedir (Tülek, 2007).

Kompaksiyonda anlatılan su miktarının etkisi kohezyonlu zeminlerde gözlenmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde taneler arası sürtünme kuvvetinin az olması, uygulanan kuvvetler zemin boşluklarındaki basınç artışına neden olmaması ve taneler arası elektriksel kuvvetler yerçekimi kuvvetine göre ihmal edilebilir düzeyde olması kompaksiyonda su miktarı daha az etkili olmaktadır. İnce kumlarda suya doymun ve kuru olduğu durumlarda kapiler gerilmeler olmadığı için tamamen suya doymun ve tamamen kuru olduğu duruma göre kompaksiyon nemli durumda daha zor olmaktadır (Tülek, 2007).

Kompaksiyon uygulamasında önemli bir yeri olan su, zemin tanelerini daha yoğun hale getirir ve zeminin yapılanmasında rol oynar. Bu sayede zeminin kuru birim hacim ağırlığı artar. Buna bağlı olarak da zeminin taşıma gücü ve kayma mukavemeti artar. Ancak belirli bir su içeriğinden sonra zeminin kuru birim hacim ağırlığı değeri düşmeye başlar (Kocabey, 2019).

Bir zeminin farklı su içeriği değerlerinde belirli bir kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılması ile kuru birim hacim ağırlığı ve su içeriğindeki değişimleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Belirli bir su içeriği değerine kadar kuru birim hacim ağırlığı artış göstermektedir, maksimum bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlamaktadır (Tülek, 2007).



Şekil 1. Artan su içeriği ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi (Tülek, 2007).

1. Bölgede: Zeminde yeterli miktarda su bulunmaması tanelerin arasındaki sürtünmeyi artırdığından, tanelerin sıkı duruma geçmesi zordur.

2. Bölgede: Sıkışmanın en yüksek olduğu noktada, kuru birim hacim ağırlığı maksimum değer almaktadır.

3. Bölgede: Zeminde fazla su bulunması ve suyun sıkışmaz özellikte olması nedeniyle zemin taneleri arasındaki boşluğun azalması mümkün olmamaktadır.

Kompaksiyon uygulaması sonucunda zemin taneleri arasındaki havanın atılması ile zemin taneleri daha sıkı duruma geçmektedir. Zeminin kuru birim hacim ağırlığının artmasının zemin özelliklerindeki yaptığı iyileştirmeler şu şekildedir: Kayma dayanımı artar, birim hacim ağırlığı yükselir, geçirimsizlik azalır, sıkışabilirlik azalır, sıvılaşma özelliği ortadan kalkabilir, dondan fazla miktarda etkilenmez, şişme ve büzümeye kontrol edilebilir, aşınabilirlik azalır ve gecikir (Tülek, 2007).

Kompaksiyon yöntemleri; darbe, titreşim, yoğurma ve statik ağırlık olarak ifade edilebilmektedir. Sıkıştırma kullanılan aletlerin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir (Tuğlu, 2022).

Tablo 4. Sıkıştırma Gereçlerinin Genel Karakteristik Özellikleri (Kocabey, 2019)

| Adı                          | Kütlesi<br>(ton) | Hızı<br>(km/saat) | Titreşim<br>(Hz) | Tabaka<br>kalınlığı (m) | Geçiş<br>sayısı |
|------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-----------------|
| Titreşimli tokmak            | 0.30- 0.10       | -                 | 7.00- 10.0       | 0.20- 0.40              | 2.0- 4.0        |
| Titreşimli plaka             | 0.06- 0.08       | 1.00              | 10.0- 80.0       | 0.15- 0.50              | 2.0- 4.0        |
| Hafif titreşimli<br>silindir | 0.60- 2.00       | 2.00- 4.00        | 25.0- 70.0       | 0.30- 0.50              | 4.0- 6.0        |
| Titreşimli ayak              | 6.00- 15.0       | 8.00- 10.0        | 25.0- 30.0       | 0.30- 1.50              | 4.0- 6.0        |
| Ağır titreşimli<br>silindir  | 6.00- 15.0       | 6.00- 13.0        | 25.0- 40.0       | 0.30- 1.50              | 4.0- 6.0        |
| Vurmalı silindir             | 7.00             | 10.0- 14.0        | -                | 0.50- 3.00              | 30'a kadar      |

#### **2.1.2.1.1.2. Drenaj yöntemi.**

Zeminlerde bulunan su zemin problemlerinin oluşmasına neden olan etkidir. Suyun etkisi ile zeminlerde aşırı doygunluk, sıvılaşma gibi problemler gözlemlenmektedir. Yollarda çökme, barajlarda borulanma, deprem esnasında meydana gelebilen sıvılaşma yer altı suyundan kaynaklanan problemlere örnektir (Tuğlu, 2022).

Drenaj uygulaması bir ortamdaki suyun yapay ve doğal yöntemler ile zeminden farklı bir ortama taşınmasıdır. Bu uygulama ile zeminin kesme mukavemetini artırmak ve stabilizasyonu sağlamak hedeflenmektedir. Kohezyonlu zeminlerin su içeriğinin artması ile taşıma gücü ve mukavemetinde azalma meydana gelmektedir (Çelik, 2020).

Kohezyonlu zeminlerin su muhtevasının artması, zeminin taşıma gücü ve dayanımının azalmasına neden olur (Kocabey, 2019). Zeminin su içeriği azaltılarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Bu nedenle zeminde stabilizasyonun sağlanması için alana su girişini engel olunması ve suyun alandan tahliye edilmesi gerekmektedir (Ayan, 2009). Drenaj uygulamaları, bir yerde bulunan suyun doğal ve yapay yöntemlerle uzaklaştırılması için yapılan işlemlerdir. Zeminin su içeriği drenaj yapıları sayesinde üniform kalır (Kocabey, 2019).

Drenaj yapıları yüzeysel drenaj ve yüzey altı drenaj olarak ikiye ayrılır. Yüzey altı drenaj uygulamasında enine yarma ve dolgularda dren borusu iri taneli dren şiltesi borusu yatay şekilde dren boruları kullanılarak yapılır. Yüzey altı drenaj yapıları düşeyde ise, hendekler kullanılarak sular uzaklaştırılır (Kocabey, 2019).

Yağışlardan oluşan suların yüzey akışının düzenlenmesinde yüzeysel drenaj yöntemi kullanılır. Menfez, drenaj hendeği, bordür hendeği, düşüm oluğu yapılarından biri deşarj edilecek suyun debisi, kullanım yeri ve amacına göre yapılmaktadır. Hendeklere eğim verilmesi ile sular uzaklaştırılır, hendek zeminleri su akışına güçleştirmeyecek özellikte yapılmaktadır (Çelik, 2020).

#### **2.1.2.1.2. Katkılı stabilizasyon.**

Mekanik yöntemlerle yapılan zemin iyileştirmelerinin yeterli olmadığı durumlarda zemine katkı maddeleri eklenerek yapılan zemin iyileştirmelerine katkılı stabilizasyon denir.

##### **2.1.2.1.2.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu.**

Kireç ile yapılan iyileştirmelerde sönmüş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ve sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) kullanılabilir. Tarım kireci olarak ifade edilen ( $\text{CaCO}_3$ ) kireç türünde sulu ortamda

kimyasal reaksiyon gözlenmez. Buna rağmen tarım kireci stabilizasyon uygulamalarında zeminin tane boyutu dağılımını düzenlemek için kullanılabilir (Çalık, 2012).

Kireç ile stabilizasyonda kirecin reaksiyona gireceği silis içeriği kumlu zeminlerde az olduğundan etkileşim gerçekleşmez. Bu durumdan dolayı kireç ile kum arasındaki etkileşim elverişli kimyasal bir malzeme ile aktifleştirilebilir. PI değeri düşük plastik özellikte olmayan zeminlerde kireç ile istenilen iyileştirmeler sağlanamamaktadır. Bu zeminlerin kireç ile etkileşimi puzolanik malzemelerle mümkündür (Çalık, 2012).

Kaba tane büyüklüğü dağılımına sahip olan zeminlerin (ince malzeme çok az veya hiç olmayan) iyileştirilmesinde kireç, çimento ve puzolanların birlikte kullanılması daha etkili olmaktadır. Puzolanlar silis ve alimünat içermesi sayesinde kireç ve suyla oluşturulan karışımlarda reaksiyona girebilmektedir. Bu şekilde yapılan iyileştirmeler sonucunda yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır (Çalık, 2012).

Kil içeren zeminlere %3-8 arası sönmüş kireç eklenerek zemin özellikleri iyileştirilebilmektedir. Kireç kil mineralinde bulunan silisle kimyasal tepkime oluşturmasıyla ortaya çıkan jel kil zemin tanelerinin etrafını sararak boşlukları doldurur. Kireçle stabilizasyonu olumsuz etkileyecek en zararlı faktör zeminde bulunan organik maddelerdir. Bu maddeler stabilizasyona negatif etkilerini başlangıçta ortaya çıkarmayıp, sonradan gerçekleşen ıslanma ve kuruma ile zeminin ufalanmasına neden olurlar. Zemine kirecin eklenmesiyle gözlenen ilk tesir plastisiteyi düşürmesidir. Gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda ortam pH'ı azalarak çökelme meydana gelir (Çakılcıoğlu, 2007).

Kireç katkılı stabilizasyon uygulamasında killi zemine kireç karıştırıldığında, kirecin kalsiyum iyonları ve kilin katyonları yer değiştirerek katyon değişimiyle kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Bazı reaksiyonlar kısa zamanda gerçekleşirken, puzolanik reaksiyonlar uygun sıcaklık ve su içeriğinde uzun zamanda gerçekleşir. Meydana gelen katyon değişimi reaksiyonunda çökelme ile kil taneleri birbirine doğru hareket eder. Kil yapısının değişimi kil tanelerinin kireç tanelerine yapışması ile gerçekleşir. Kil ve kirecin bir araya gelmesiyle kilin su emme özelliği ortadan kalkar. Bu nedenle plastik kıvamdaki killi zemin katı kıvam alır. Açığa çıkan kimyasal reaksiyonlar ortamın nem ve sıcaklığına bağlı olarak devam eder. Kimyasal reaksiyonların devam etmesi zeminin elastisite modülü değerinin artmasını sağlar ve bu sayede zeminin taşıma gücü de artar (Ayan, 2021).

Kireç stabilizasyon uygulamasının etkisini olumlu etkileyen en önemli faktör amorf yapıdaki silikat ölçüsü ve alüminat içeriğidir. Büyük projelerin imalatında zeminin

iyileştirilmesi için gerekli olan kireç miktarı laboratuvarında 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde bulunan optimum kireç katkısının değeri bulunarak belirlenir (Çakılcıoğlu, 2007).

Kireçle iyileştirme yapılan killi zeminlerin mekanik özelliklerindeki değişimleri gözlemlemek için katkı miktarını artırmak veya uzun süre sonra etkilerini analiz etmek gerekir. Yapılan araştırmalar incelendiğinde kil ve kireç reaksiyonunun kısa ve uzun dönem etkileri olduğu için araştırmacılar tarafından bunun ‘iki fazlı etkileşim’ olduğu onaylanmıştır. Kısa periyotta fiziksel ve kimyasal tepkimeler gerçekleşip son bulurken, uzun periyotta gerçekleşen reaksiyonlar puzolanik özellikte olup başlangıçta amorf sonrasında kristal yapıda olurlar (Balta, 1984).

Kil ve kireç karışımlarında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar sonucunda killi zeminlerde; plastik limit artar, likit limit azalır ve zeminin dayanıklılığı ile taşıma gücü artar (Ayan, 2021).

Kireç ile yapılan iyileştirmelerde killi zeminlerin iyileştirilmesinde sönmüş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) tercih edilmektedir. Sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) yakıcı ve tehlikeli özellikte olması sebebiyle çoğunlukla kullanılmamaktadır (Ayan, 2021). Zemin stabilizasyonunda zeminin türüne göre gerekli olan kireç yüzdeleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. *Zemin Cinsine Göre Yaklaşık Kireç Miktarı (Ayan, 2021)*

| Zemin cinsi                  | Kuru zemin ağırlıkça yüzdesi |
|------------------------------|------------------------------|
| İyi derecelenmiş killi çakıl | 3                            |
| Kumlu kil                    | 5                            |
| Kumlar                       | Tavsiye edilmez              |
| Siltli kil                   | 2-4                          |
| Plastik kil                  | 3-8                          |
| Yüksek plastisiteli kil      | 3-10                         |
| Organik zeminler             | Tavsiye edilmez              |

Kireç ile iyileştirmelerde zemin birkaç saatte dayanım almaya başladığı için kompaksiyon işlemi zaman geçmeden yapılmalıdır. Kompaksiyonun gecikmesi maksimum kuru yoğunluk değerini olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı zemin, kireç ve su karışımı tamamlandıktan sonra yapılan kompaksiyon işlemi en fazla yarım saat içinde hızlı bir şekilde bitirilmelidir. Sönmemiş kirecin ( $\text{CaO}$ ) su ile reaksiyonunda çok fazla ısı oluşmaktadır. Uygulamada kullanılan sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) olması durumunda açığa çıkan ısının su kaybına yol açmaması için kompaksiyon hızlı yapılmalı ve küre tabi tutulmalıdır (Çalık, 2012).

#### 2.1.2.1.2.2. Çimento ile zemin stabilizasyonu.

Çimento kalker, kil ve alçı taşı bileşimine sahip olan, su ile birleşiminde sertleşen yapıya sahip hidrolik bir bağlayıcıdır. Genellikle Portland çimentosu tercih edilen türüdür. Zemin iyileştirilmesi çalışmalarında zeminin kuru ağırlığının %5-15'i kadar oranda çimento zemine karıştırılarak daha sonra kompaksiyon uygulanır. Çimento zemin taneleri arasında gerçekleşen bağ sayesinde zeminin dayanımında artış gözlenir. Organik ve saf kohezyonlu yapıda olan zeminlerin dışında kalan zeminler için elverişli iyileştirme metodudur. İyileştirmede kullanılacak olan optimum çimento miktarı serbest basınç dayanımı deneyleri ile belirlenir. Zemin taneleri ince olduğunda optimum su içeriğinden daha fazla su eklenerek deneylerin yapılmasıyla isabetli sonuçlara ulaşılması sağlanır (Yılmaz, 2015).

Çimento ile zemin stabilizasyon yönteminde iyileştirilmek istenen derinlik ölçüsünde zemin gevşek duruma getirilir. Laboratuvar çalışmalarıyla tayin edilen oranda çimento ve optimum su miktarı zemine eklenir. Karıştırma tamamlandıktan sonra zemin yerleştirilip silindir kullanılarak sıkıştırılır (Ayan, 2021).

Çimento ile zemin iyileştirme uygulamaları çok uzun zamandır kullanılan yöntemdir. İngiltere'de 1917 yıllarında zemin iyileştirme çalışmalarında, Amerika'da ise 1920'lerde karayolunun iyileştirilmesinde kullanılan yöntemdir. Son dönemlerde Türkiye'de de zemin iyileştirme çalışmalarında tercih edilen bir metot olmuştur. Kireç gibi çimento da karayolunda ve havaalanlarında yol temel ve alt temel katmanlarının iyileştirilmesinde sıkça kullanılmaktadır (Yılmaz, 2015). Zemin stabilizasyonunda değişik zemin cinslerine göre gerekli olan çimento yüzdeleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı Zemin Sınıflarına Göre Çimento Miktarı (Yılmaz, 2015)

| AASHTO zemin sınıfı | Birleştirilmiş zemin sınıfı | Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça) | Çimento ihtiyacı sınırları |            |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------|
|                     |                             |                                     | %hacimce                   | %ağırlıkça |
| A-1-a               | GW, GP, GM, SW, SP, SM      | 5                                   | 5-7                        | 3-5        |
| A-1-b               | GM, GP, SM, SP              | 6                                   | 7-9                        | 5-8        |
| A-2                 | GM, GC, SM, SC              | 7                                   | 7-10                       | 5-9        |
| A-3                 | SP                          | 9                                   | 8-12                       | 7-12       |
| A-4                 | CL, ML                      | 10                                  | 8-12                       | 7-12       |
| A-5                 | ML, MH, CH                  | 10                                  | 8-12                       | 8-13       |
| A-6                 | CL, CH                      | 12                                  | 10-14                      | 9-15       |
| A-7                 | MH, CH                      | 13                                  | 10-14                      | 10-16      |

#### 2.1.2.1.2.3. Kullanılmış lastikler ile zemin stabilizasyonu.

Çevresel unsurlara karşı dirençli bir yapıya sahip olan, yüksek moleküler yapıli polimerlerden elde edilen lastikler, kullanım ömrünü tamamladıktan sonra doğada ayrışması

çok zor olan atık lastikleri meydana getirirler (Çetin, 2011). Polimer maddelerin doğada uzun kalmaları çevreye zarar vermektedir. Ortaya çıkan atık lastik miktarının fazla ölçüde olması bu durumu önemli hale getirmiştir. Atık lastiklerin çevreye olan zararını önlemek için yapılan geri dönüşüm çalışmaları çevre problemlerini önlemede ve ekonomik fayda sağlamada oldukça önemlidir. Atık lastiklerden enerji elde edilebilmesi ve başka bir ürünün ana malzemesi olarak kullanılabilmesi için yapılan geri dönüşüm uygulamasında ısıtma işlemleri kullanılmaktadır (Tuğlu, 2022).

Araba lastikleri hammadde olarak kauçuktan oluşur. Kauçuk uzun polimer zincirlerinden oluşmaktadır. Bu uzun polimer zincirleri birbirinden bağımsız yapıda olmaları sebebiyle bağ kuvvetlerinin zayıf olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple çevresel etkenlere karşı direnci düşük olan bir malzemedir (Çetin, 2011).

Charles Goodyear polimer zincirleri arasında oluşturulabilecek kükürt bağlarını ortaya çıkarmıştır. Birbirleri üzerinden kayan bu kükürt bağlarını çapraz bağ olarak tanımlamıştır. Kauçuk malzemesinin polimer zincirlerinin arasında kükürt bağlarının oluşturulması vulkanizasyon olarak ifade edilir (Çetin, 2011).

Kauçuk malzemesinin bağlarını güçlendirmek için yüksek sıcaklıklar ile yapılan vulkanizasyon işlemi sayesinde kauçuk sert yapı kazanmaktadır. Bu işlem sayesinde kauçuk ısındığında erimeyen soğuduğunda kırılmayan özellikte olur. Vulkanizasyon işlemi dezavantaj olarak polimer malzemelerin bağ yapılarını değiştirdiği için, bu malzemeler eski haline geri getirilemez. Bu nedenle oluşan atık araba lastiklerinin yeniden değerlendirilmesi tekrar kullanılması veya ortadan kaldırılması ile mümkündür (Çetin, 2011).

İnşaat mühendisliği alanında da atık lastiklerin kullanımı çeşitli uygulamalarda görülmektedir. Kullanımı tamamlanmış olan lastiklerin maliyetinin az olması, hafif olmaları, kayma mukavemetinin yüksek olması, drenaj için uygun olmaları, düşük geçirimsizliğe ve yanal gerilmelere sahip olmaları sayesinde elverişsiz zeminlerin dolgusunda, ulaştırma alanında yol dolgusunda, asfalt donma bariyerlerinde, sınır drenlerinde, yapısal olmayan ses yalıtım duvarlarında kullanılabilmektedirler (Çetin, 2011). Yapılan yol temel çalışmaları incelendiğinde dolgu malzemesi olarak kullanılan atık lastiklerin diğer dolgu malzemeleri kadar iyi özellik sunduğu gözlenmektedir. Atık lastiklere ait özellikler Tablo 7’de verilmiştir (Tuğlu, 2022).

Tablo 7. Atık Lastiklerin Mekanik Özellikleri (Tuğlu, 2022)

| Özellikler              | Değerler |
|-------------------------|----------|
| Sürtünme açısı (°)      | 19- 26   |
| Sıkıştırılabilirlik (%) | %20- 50  |

|                                            |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Hidrolik iletkenlik (m/ sn)                | $10^{-2}$ - $10^{-3}$ m/sn |
| Birim hakim ağırlığı (kN/ m <sup>3</sup> ) | 6.00- 7.00                 |
| Poisson oranı                              | 0.20- 0.35                 |
| Elastik modülü (N/ mm <sup>2</sup> )       | 1- 2                       |
| Özgöl ağırlık (kN/ m <sup>3</sup> )        | 11- 12.7                   |

Lastiklerin yeniden kullanılabilmesi şerit, granüle ve toz durumuna getirilmesi veya bir arada sıkıştırılıp çelik ya da halatlarla sarılarak lastik balya elde edilmesiyle mümkündür. Fakat inşaat mühendisliği uygulamalarında bütün haldeki lastikler yerine lastik parçalarının kullanımı daha fazladır. Ulaştırma alanında yapılan dolgu çalışmalarında lastik parçalarının yalıtım, drenaj ve filtreleme özelliklerinden faydalanılmaktadır (Çetin, 2011).

Lastik balyaların zemin stabilitesini sağlamada kullanılabilmesi üzerine yapılan çalışmalar devam ettiği için henüz olumlu bir çalışma sonucu belirlenememiştir. Ancak lastik balyalar değişik mühendislik çalışmalarında değerlendirilmektedir (Çetin, 2011).

Bütün haldeki lastiklerde inşaat alanında istinat ve şev yapılarında donatı yerine, istinat duvarlarının kaplamalarında, iç ve dış duvarlarında temel yapı malzemesi olarak kullanılabilir (Çetin, 2011).

#### 2.1.2.1.2.4. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu.

Tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan, ince taneli yapıda iken sulu ortamda  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kimyasal tepkimeye girdiklerinde oluşturdukları jel ile hidrolik bağlayıcılık kazanan silisli ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminli ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içeriğe sahip malzemelere puzolan denir (Çetin, 2011).

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki sınıfta incelenirler. Doğal puzolanlar volkanik kaynaklı ve ısıtılma tabii tutulmuş killeri olarak sınıflandırılırken yapay puzolanlar; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü olarak sınıflandırılırlar (Çetin, 2011).

Yapay puzolan sınıfında yer alan uçucu küller birçok uygulama alanına sahiptir. Uçucu kül, termik santrallerinde öğütülmüş kömürün yanması sonucunda elde edilen atık malzemedir (Öntürk, 2011). Termik enerji santrallerinde açığa çıkan baca gazlarındaki ince tanelerin atmosfere verilmeden önce filtreler ile tutularak toplanır. Santralde öğütülmüş kömürün yanması ile baca gazları dışında kazan tabanına çökmesiyle daha iri taneli yapıda olan taban külleri elde edilir (Çetin, 2011).

Uçucu külün puzolanik özelliklerini etkileyen etkenler şu şekildedir;

1.  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bileşenlerinden oluşan uçucu külde, bu bileşenlerinin oranının artmasıyla ve bileşenlerin amorf yapıda bulunmasıyla uçucu külün puzolanik özelliğini artır.
2. Uçucu külün içindeki  $\text{CaO}$ ,  $\text{SO}_3$  ve alkali oksitlerin, puzolanik özelliğe olan etkisi henüz net belirlenememiştir.
3. Uçucu külde bulunan yananmış kömür miktarının artışı puzolanik özelliği azaltır.
4. Uçucu kül yapısında bulunan karbon boşluklu yapıdadır ve dayanımı düşüktür. Su ihtiyacını artmasına neden olur.
5. Uçucu külün doğal halinde çok ince olması ya da en az çimento tane boyutu kadar öğütülmesi dayanımı ve puzolanik özelliği artırır (Çakılcıoğlu, 2007).

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri, puzolanik aktivitesini etkileyen faktörlerdir. Puzolanik aktivitesi sadece uçucu külü oluşturan bileşenlerin miktarında meydana gelen değişiklikten değil aynı zamanda, kömürün yakıldığı kazanın çalışma şekline, santralde kullanılacak olan kömürün öğütülme derecesinden ve hava kirliliğini önlemek için kullanılan kömüre eklenen katkı malzemelerine bağlı olarak değişir. (Alkaya, 2009)

Dünyada oluşan uçucu kül miktarı yaklaşık yılda 600 milyon ton kadardır. Ülkemizde bulunan 11 termik santral yılda ortalama 16 milyon ton uçucu kül oluşturmaktadır. Artan doğalgaz santrallerine bağlı olarak bu miktar farklılık göstermektedir. Uçucu külün miktarında meydana gelen artış, yeni alanlarda kullanılması açısından oldukça önemlidir (Tuğlu, 2022).

Termik santrallerden elde edilen atık malzeme olan uçucu küllerin değerlendirilmesi ülke ekonomisine fayda sağlamakla birlikte uçucu küllerin dışarı atılmasında, taşınmasında ve depolanmasında oluşabilecek çevre kirliliğini de önlemektedir. Uçucu küllerin yeniden kullanımı ile ilgili inşaat mühendisliği uygulamalarında beton ve çimento imalatında faydalanılması, çevresel açıdan ve ekonomik olarak oldukça önemlidir (Çetin, 2011).

Uçucu küllerin zemin çalışmalarında kullanımının artması önceden yapılan uygulamalarda etkili sonuçlar elde edilmesinden kaynaklıdır. Uçucu kül yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde elverişli ve ekonomik açıdan etkili olmaktadır. Zemin stabilizasyonu uygulamasında zemine uçucu kül eklenerek karıştırılır. Elde edilen zemin uçucu kül karışımı amacına uygun sıkıştırıcılarla sıkıştırılır. Uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olması ile su ve kireçle karıştırıldığında kimyasal tepkimeler gerçekleşir ve bağlayıcılık niteliğe sahip olur. Killi zeminlerde kireçle yapılan stabilizasyonda ilave olarak uçucu kül kullanıldığında oluşan puzolanik etki kuvvetlenir ve zeminin tane çapından daha büyük taneler meydana gelir (Topçu, 2022).

Uçucu külün zeminle karıştırılması ile meydana gelen puzolanik reaksiyon, Portland çimentosunun hidratasyonuna benzemektedir. Ancak uçucu külün puzolanik reaksiyonu daha yavaş gerçekleştiği için daha uzun sürede tamamlanmaktadır (Dağlı, 2021).

Uçucu külün sınıfı, zemin stabilizasyon uygulamalarında uçucu külün kullanımını etkileyen en önemli etkenlerdendir. Uçucu kül kimyasal yapısında bulundurduğu CaO miktarına göre iki grupta incelenir. CaO miktarı %10'dan az olan uçucu küller (düşük kireçli) F tipi uçucu kül grubunda, CaO miktarı %10'dan fazla olan uçucu küller ise C tipi uçucu kül grubunda yer alırlar (Çetin, 2011). Uçucu küle ait fiziksel özellikler Tablo 8'de, reaksiyon için gereken fiziksel değerler Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri (Tuğlu, 2022)

| Çap (Mikron) | Renk | Şekil    | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | İncelik                      |
|--------------|------|----------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 – 200      | Gri  | Yuvarlak | 2,2- 2,7                      | Yaklaşık çimento inceliğinde |

Tablo 9. Uçucu Küllerin Sağlaması Gereken Fiziksel Değerleri (Tuğlu, 2022)

|                                               | 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 <sup>2</sup> /g          | -                 | -        | 300000        |
| Dayanım aktivite indeksi:                     | 75                | 75       | 70            |
| 28. gün, min. %                               |                   |          |               |
| Su ihtiyacı:                                  |                   |          |               |
| Kontrol numunesine kıyasla, maks. %           | 105               | 105      | -             |

Uçucu kül yüzeysel stabilizasyon uygulamalarında yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır. Uçucu kül taşıma gücü yetersiz ve sıvılaşma problemi olan zeminlerde, mekanik ve kimyasal yöntemlerde kullanılan elverişli malzemedir. Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılması; mukavemetin artmasına, ilave kazı ve dolgu işlemlerine gerektirmediği için ekonomik fayda sağlamasına, elverişli olmayan zemin koşullarını iyileştirerek imalat hızının artmasına ve taşıma gücünü arttırdığı için dolgu kalınlığının azalmasını sağlar (Çetin, 2011).

Yüzeysel zemin stabilizasyonunda uçucu külün kullanım metodu kireç ve çimento uygulaması ile aynı şekildedir. Uçucu kül zemin stabilizasyonunda kullanılmadan önce laboratuvar da optimum uçucu kül ve su miktarları belirlenir. Belirlenen miktarlar uygun araçlarla zemin yüzeyine serilir. Tayin edilen derinliğe kadar uygun araçlarla karıştırılır ve sonrasında sıkıştırıcı aletlerle sıkıştırılır (Çetin, 2011).

### 2.1.3. Geopolimer

Geopolimerler Prof. J. Davidovits tarafından ilk defa 1978’de tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Davidovits geopolimerleri doğal mineral içeriğe sahip maddelerin kimyasal ve kristal yapılarının farklı metotlar kullanarak değiştirilmesiyle ortaya çıktığını belirtmiştir. Geopolimerler kullanılan metotlar ile amorf ya da kristal yapıya sahip olabilirler. Silis ve alümin içerikli malzemelerin alkali ortamda kayalar gibi meydana gelmeleriyle bağlayıcı malzemelerin laboratuvar şartlarında elde edilmektedir (Şinik, 2019).

Geopolimerler yapısal olarak doğal kayalarla ortak niteliklere sahiptir. İçerdiği silisyum oksit ve alüminyum oksit bileşenleri, alkali ortam koşullarında reaksiyon gerçekleştirerek kayaç türevi malzemeler oluşturur. Geopolimer üretimi, amorf yapıdaki malzemelerin içerdikleri silis ve alüminyum bileşenlerinin yüksek alkali çözeltisiyle oluşan bir işlemdir (Bakırdöven, 2021).

Polimer bileşimli çimento olan geopolimerler, potland çimentosu gibi dayanıklı ve elde edilme yöntemi daha çevreci olan bir malzemedir (Avlayan, 2022). Geopolimer, endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle beton üretiminde kullanılmak için geliştirilmiş bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimerler alkali aktivatör çözeltilerin, zengin silis ve alüminyum içeriğine sahip olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi endüstriyel atıkların birbirleriyle reaksiyona girmesiyle elde edilirler. Geopolimerin oluşumunun şematik diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir (Topal, 2020).



Şekil 2. Geopolimer oluşumunun şematik diyagramı (Yegin, 2020).

Geopolimerler amorf ya da kristal yapıya sahip olabilirler. Geopolimerler, mekanik dayanımı yüksek, rötre oranı düşük, yangın gibi aşırı sıcaklığa karşı dayanıklı ve gerekli olan enerji ihtiyacı az olan performans sunmaktadırlar (Bakırdöven, 2021).

Geopolimerler sadece inşaat mühendisliği alanında değil, diğer mühendislikler, organik kimya, fizikokimya, jeoloji ve uzay teknolojileri gibi pek çok alanlarda yapılan çalışmalarda yer almaktadır. Sahip oldukları kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde birçok alanda kullanılmaktadırlar. Yangına karşı dayanıklı malzeme üretiminde, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanların inşasında, beton ve çimento imalatında, atık su tünellerinde, zemin stabilizasyonunda, beton yol kaplama çalışmalarında, beton yapıların güçlendirilmesinde, mimari değere sahip taş yapıların yenilenmesinde, tarihi eserlerin restore edilmesinde, seramik kaplama uygulamalarında, nükleer santrallerde, nükleer atıkları depolama uygulamalarında, uçak sanayisinde kullanılmaktadır (Şinik, 2019).

Geopolimerlerin düşük ısı iletkenliği, kısa sürede dayanım kazanabilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, dayanıklılığı, kimyasal etkenlere ve asitlere karşı dayanıklı olabilmesi, kür sıcaklığının düşük olması ve çevreye olan zararı daha az olması özellikleri sayesinde diğer bağlayıcılara göre üstünlük sağlamaktadır (Şinik, 2019).

#### **2.1.3.1. Geopolimerlerin kimyası.**

Son dönemlerde silikat ve alümin içeren yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel atık malzemelerin alkali aktivasyonu ile açığa çıkan ve çimento yerine kullanılabilen bağlayıcı malzemeler elde edilmektedir. Geopolimer malzeme elde etmek için kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_2$ ) ve sodyum karbonattır ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Atabey, 2017).

Geopolimerizasyon, katı alüminosilikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltilerinin yüksek alkali şartlarda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve çoklu yoğunlaşması ile Si-O-Si ve Si-O-Al ve bağlarından oluşan amorf ve kristal polimerleri elde etmek için gerçekleşen heterojen ve ekzotermik kimyasal reaksiyonlardır (Bingöl, 2018).

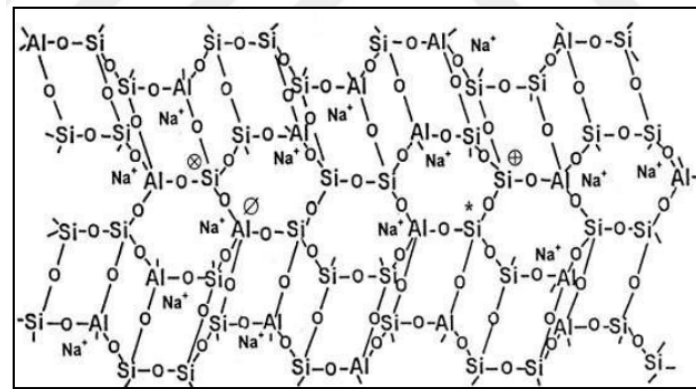
Geopolimerlerin malzeme yapısında alkali çözeltideki Si/Al oranı etkili faktördür. Bu oran azaldıkça kristal yapıda, arttıkça da hem kristal hem de amorf yapıda olan akışkan halde geopolimerler elde edilebilmektedir (Şinik, 2019). Si/Al oranı 1 olduğu durumda seramik, tuğla ve yangına karşı dayanıklı olan koruyucu malzemeler elde edilebilir. Bu oranın 2 olması durumunda amorf yapıdaki seramik elde edilir çimento ile beton üretimi gerçekleştirilir ve radyoaktif atık depolama alanları oluşturulabilmektedir. Bu oran 3 olduğunda yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olabilen malzemeler ve yangına karşı kaplamalar üretilmektedir (Atabey, 2017). Bu oran 15'in üzerinde olduğunda ise savaş uçaklarında ve ısıya karşı dayanımı yüksek olan malzeme imal edilebilmektedir (Şinik, 2019).

Geopolimerizasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesini ve geopolimer harçların işlenebilirliğini sağlayan önemli bir bileşen olan sodyum silikatın ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) hidrolitik kararlılığı,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranına bağlı olarak değişmektedir. Molar oranın artması ile hidrolitik kararlılık yükselmektedir. Molar oranı 4.4'ten büyük olan sodyum silikatlar yüksek hidrolitik kararlılık gösterdiğinden uygulamada suda çözünmez olarak düşünülmektedir (Bingöl, 2018). Alkali ve silikatlarla meydana gelen çözeltilerdeki  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı çözünen alkalilerin polimerizasyon derecesine etki ederek geopolimerlerin basınç dayanımlarını önemli miktarda etkilemektedir (Özbey, 2021). Yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar orana sahip sodyum silikatlar yüksek basınç dayanımına sahip olmaktadır (Bingöl, 2018).

Geopolimerizasyon reaksiyonunda  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı sodyum silikatın aktivatör olarak kullanılabilmesini etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı değerine sahip sodyum silikat aktivatörü uçucu küllü geopolimer karışımlarında erken priz alma problemi oluşturmaktadır (Atabey, 2017).

Geopolimerizasyon reaksiyonunun işleyişi, katı haldeki alüminosilikat, sıvı alkali çözeltisinde çözülür. Katı haldeki alüminosilikat, sıvı alkali çözeltisinde çözülür. Sıvı çözelti içerisinde inorganik yapıda polimerlerin oluşması için daha küçük birimlerin çoklu yoğunlaşması gerçekleşir ve geopolimer yapıda olan çözünmemiş partiküller birbirine bağlanır (Bingöl, 2018).

Davidovits alümina silikat içeren malzemelerin çoklu yoğunlaşması ile açığa çıkan geopolimer malzemesinin reaksiyonunu geopolimerizasyon tanımı ile ifade etmektedir. Geopolimer malzemesinin meydana gelmesinde gerekli olan bileşenleri ve reaksiyon sonucunda açığa çıkan bileşenleri teşhis ederek zincir yapı modelini tasarlamıştır. Zincir modeli Şekil 3'de gösterilmiştir (Atabey, 2017).



Şekil 3. Davidovits zincir yapı modeli (Atabey, 2017).

Geopolimerizasyon mekanizması endüstriyel atıklardan elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerin alkali silikat ve tuzların düşük ısıda reaksiyona girmesiyle oluşur. Açığa çıkan malzeme fiziksel açıdan; katı malzemenin yapısı, ısı kürü, kalsinasyon ısı ve süresi etkenlerine göre farklılık göstermektedir. Kısacası geopolimer silikat ve alüminat içeriğine sahip fırınlanmış kilin bu bileşenlerin oksijen atomunun elektronlarını paylaşması ve kovalent bağ kurmasıdır (Bingöl, 2018). Silikat ( $\text{SiO}_2$ ) kararlı bir yapıda olmasına rağmen alkali koşullarda bulunduğu yapı gücsüzleşir ve Si-O-Al ve Si-O-Si geopolimer bileşenleri oluşur ve bu sayede geopolimerizasyon devam eder. Ana bileşenlere uygulanan  $100^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtıl işlem ile geopolimerizasyon mekanizması hızlandırılabilir ve Si-O-Al ve Si-O-Si bileşenlerinin reaksiyona girme miktarları yükseltilebilmektedir (Şinik, 2019).

### 2.1.3.2. Geopolimerlerin alkali aktivasyonu.

Çimento sahip olduğu elverişli özelliklerinin yanında, olumsuz etkilere de sahiptir. Çimento fazla miktarda  $\text{CO}_2$  gazı açığa çıkaran ve çok fazla uygulama alanında yer alan malzemedir. Bu sebeple çimentonun olumsuz etkileri dikkate alarak hem daha ekonomik hem de çevreci olan, çimento yerine kullanılabilecek yeni bağlayıcı malzeme arayışı artış göstermektedir (Atabey, 2017). Uçucu kül, metakaolin, yüksek fırın cürufu gibi silis ve alümin içerikli endüstriyel atığı malzemelerin alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcılığa sahip geopolimer malzemesi elde edilebilmektedir. Geopolimerlerin elde edilmesinde kaolin kili, metakaolin, zeolit, yüksek fırın cürufu, uçucu kül çoğunlukla kullanılan malzemelerdir (Bingöl, 2018). Aktivatör olarak da sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, kalsiyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum sülfat, sodyum karbonat kullanılabilmektedir (Atabey, 2017).

Alkali aktivasyon gerçekleşirken  $60^\circ\text{C}$  ve üzeri sıcaklıkta, sayesinde geopolimerler mekanik açıdan olumlu etkilenmektedir. Geopolimerlerin elde edilmesinin kolaylığı, ekonomik olması ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle çevreci bir yaklaşıma sahip olması tercih edilmesindeki artışın sebeplerindendir. Geopolimer elde edilmesinde uçucu kül atığının kullanılması ile uygulanabilirlik, çevresel, ekonomik ve elde edilen ürün nitelikleri açısından sağladığı faydalar önem arz etmektedir. Amorf yapı ve tane boyutunun ince olması uçucu kül ile elde edilen geopolimerlerin oluşum mekanizmasını etkileyen unsurlardır (Atabey, 2017).

Alkali aktivasyonun gelişimi 1939'da Feret ve 1940'da Purdon'ın cüruf ile ilgili yaptığı çalışmalarla başlamıştır. Alkali aktivasyonun ile ilgili yapılan birçok çalışma yapılması bu sürecin gelişmesini sağlamıştır. Alkalilerle aktivasyon sürecinin gelişimi Tablo 10'da verildiği gibidir (Bingöl, 2018).

Tablo 10. Alkali Aktivasyon Tarihsel Gelişimi (Bingöl, 2018)

| Tarih     | Gelişme                                                                                   | Yazar                        |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1939      | Çimentoda cüruf kullanımı                                                                 | Feret                        |
| 1940      | Alkali-cüruf birleşiminin kullanımı                                                       | Purdon                       |
| 1959      | Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi                                          | Glukhovsky                   |
| 1965      | Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı | Glukhovsky                   |
| 1986      | Sentetik Melit cüruflarının aktivasyonu                                                   | Malolepsy ve Petri           |
| 1989      | Cürufun alkali aktivasyonu                                                                | Talling ve Brandstetr        |
| 1990      | Cürufllu çimentoların aktivasyonu                                                         | Wu ve diğer                  |
| 1991      | Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcıların geliştirilmesi                               | Roy ve diğer.                |
| 1993      | Cüruf çimentosu                                                                           | Roy ve Malek                 |
| 1994      | Alkalın bağlayıcılar                                                                      | Krivenko                     |
| 1995      | Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapı incelemeleri                                 | Wang ve Scrivener            |
| 1996      | Alkalilerle aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirirmliliği ve boşluk yapısı           | Shi                          |
| 1997      | Alkalilerle aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları                                 | Fernández-Jiménez ve Puertas |
| 1998      | Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı                                         | Katz                         |
| 1999      | Geopolimer sitemlerin kimyası ve teknoloji                                                | Davidovits                   |
| 2000      | Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül- cüruf çimentosu                                     | Puertas                      |
| 2001-2002 | Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu beton                                                 | Bakharev                     |
| 2003      | Atıkların bertaraf edilmesi                                                               | Palomo                       |
| 2004      | Zeolit oluşumu                                                                            | Grutzeck                     |
| 2008      | Geopolimerlerin tek başına kılınılması                                                    | Hajimohammadi ve ark.        |
| 2009      | Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları                         | Provis ve Van Deventer       |

### 2.1.3.3. Geopolimerlerin uygulama alanları.

Geopolimer ile elde edilen harç ve betonların, çimento ile elde edilen betonlara göre pek çok avantaj sağlayan özellikleri bulunmaktadır. Geopolimerlerin sağladığı bu avantajlar şunlardır, geopolimerlerin hammaddesi olan silis ve alümin içerikli malzemeler endüstriyel kaynaklı olduğu için oldukça fazla miktarda bulunmaktadır, geopolimer betonlar, çimento ile elde edilen betonlar kadar enerjiye ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle üretiminde fazla enerji harcanmaz. Geopolimer betonlar, çimento ile elde edilen betonlara göre CO<sub>2</sub> salınımı oldukça azdır, geopolimer betonlar ile istenilen dayanımlar çok daha kısa sürede elde edilebilmektedirler. Geopolimer betonlara ısı kürü uygulandığında beklenen basınç dayanımının yüzde 70’ini kazanır ve normal betonlara göre bu betonlar, zararlı çevre şartlarında daha uzun süre dayanımını koruyabilmektedir (Altındal, 2020).

Geopolimer bağlayıcılarla elde edilen malzemelerin yukarıda anlatılan avantajları sayesinde oldukça fazla uygulama alanında yer almaktadır. Geopolimerlerin uygulama alanları, Yapısal betonlarda, beton kaldırımlarda, gaz beton uygulamalarında, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda, radyoaktif atık stabilizasyon betonlarının imalatında, sulama sistemlerinin ve dalgakıran imalatında, döşeme ve temel yapımı uygulamalarında, prefabrik yapı inşaatında, duvar blok elemanı imalatında ve petrol kuyularında uygulanmaktadır (Atabey, 2017).

#### **2.1.4. Alkali Aktivatörler**

Geopolimerlerin elde edilmesinde, sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ), sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) gibi alkali aktivatörler kullanılabilir. Fakat sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılarak yapılan çözelti karışımı geopolimerin özelliklerine olumlu etki ettiğinden ve ekonomik olduğundan daha çok tercih edilen alkali aktivatörlerdir (Karaaslan, 2021).

Geopolimer elde etmek için kullanılan alkali aktivatörün türü, geopolimerizasyon reaksiyonu için önemli bir etkiye sahiptir. Geopolimerizasyon sisteminde alkali hidroksitler çözünabilir silikat ile birlikte kullanıldığında, tek başına kullanılmasına göre reaksiyonun daha hızlı olmasını sağlamaktadırlar. Potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) kullanılırsa sodyum hidroksitin ( $\text{NaOH}$ ) kullanımı bağlayıcı malzememdeki minerallerin daha fazla çözünmesini sağlamaktadır (Tuyan, 2017). Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) kullanılarak yapılan çözelti karışımı alkali aktivatör olarak kullanılabilir. Daha önce yapılan bir araştırmada sodyum hidroksit çözeltisine potasyum hidroksit çözeltisi eklenmesiyle oluşan geopolimer bağlayıcıda ortalama boşluk çapında artış ve asit direncinde azalış olduğu gözlenmektedir (Karaaslan, 2021).

##### **2.1.4.1. Sodyum hidroksit.**

Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ), ucuz olması, gerekli olduğu durumda kolay bir şekilde ve istenilen miktarda bulunabilmesi avantaj sağlamaktadır (Altındal, 2020). Kostik soda olarak da ifade edilen sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ), beyaz renkte ve nem çekme özelliğine sahip katı bir maddedir. Suda çözünmesi ısı yayması ile gerçekleşir ve çözündüğünde kayganlık hissi veren bir çözelti elde edilir.  $\text{NaOH}$  nem kaptığı durumda bozulma gerçekleşir (Akyıldırım, 2021). Aynı zamanda  $\text{NaOH}$ , laboratuvar ortamında asidik gazların tutulmasını sağlar. Sodyum hidroksitin kimyasal yapısı Tabloda verilmiştir. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Tablo 11’de verilmiştir (Yakupoglu, 2010).

Tablo 11. *Sodyum Hidroksitin Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| Oksit | Asidi metrik | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Cl     | SO <sub>4</sub> | Pb      | Al      | Fe      |
|-------|--------------|---------------------------------|--------|-----------------|---------|---------|---------|
| %     | ≥ 97         | ≤ 1                             | ≤ 0.01 | ≤ 0.01          | ≤ 0.002 | ≤ 0.002 | ≤ 0.002 |

#### 2.1.4.2. Sodyum silikat.

Sodyum silikat, Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub> formülü ile ifade edilen tüm bileşiklere verilen isimdir. Formülde yer alan n oranı, sıvı halde sodyum silikat elde etmek istenildiğinde 1.60 ve 3.85 arasında değer almaktadır. Bu aralık dışında n değerine sahip sodyum silikat sıvılarının stabiliteleri sınırlıdır. İlk olarak kum ve sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 1350–1450 °C'de eritilerek sodyum silikat camı elde edilir. Devamında bu cam 140-160 °C sıcaklık ve elverişli buhar basıncında çözülerek sodyum silikat elde edilir (Karaaslan, 2021). Sodyum silikat suda çözünen bir cam olmasından dolayı cam suyu olarak da ifade edilir. Erime noktası değeri yüksektir. Sodyum silikat, tekstil sanayisinde, seramik, kâğıt, sabun ve ateşe dayanıklı malzeme üretiminde kullanılmaktadır (Yakupoğlu, 2010). Erken sertleştirici ve kendini iyileştirebilme özelliği sayesinde püskürtme betonlarda yapı malzemesi olarak kullanılabilir. Sodyum silikatın kimyasal yapısı Tablo 12’de verilmiştir (Karaaslan, 2021).

Tablo 12. *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 <sup>3</sup> ) (20 °C) | min. 1.382           | 1.390  |
| Na <sub>2</sub> O (%)                 | 11.0 – 12.0          | 11.62  |
| SiO <sub>2</sub> (%)                  | 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  |

#### 2.1.4.3. Sodyum karbonat.

Yıkama sodası olarak da ifade edilen sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), gerekli olduğu durumda kolay bir şekilde ve istenilen miktarda bulunabilen, ucuz olan bir bileşiktir. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bileşiği deniz bitkilerinin ve kayaların bazılarında mineral olarak bulunmaktadır. Sodyum karbonatın kimyasal yapısı Tablo 13’de verilmiştir (Yakupoğlu, 2010).

Tablo 13. *Sodyum Karbonatın Kimyasal Kompozisyonu (Yakupoğlu, 2010)*

| Oksit | Asidi metrik | Cl      | PO <sub>4</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | N        |
|-------|--------------|---------|-----------------|------------------|-----------------|----------|
| %     | ≥ 99.9       | ≤ 0.002 | ≤ 0.001         | ≤ 0.002          | ≤ 0.005         | ≤ 0.001  |
| Oksit | Pb           | Al      | Ca              | Fe               | K               | Mg       |
| %     | ≤ 0.0005     | ≤ 0.001 | ≤ 0.005         | ≤ 0.0005         | ≤ 0.01          | ≤ 0.0005 |

### **2.1.5. Fiberler (Elyaf lar)**

Esneklik, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahip olan fiberler doğal kaynaklardan elde edildiği gibi arzu edilen niteliklerde endüstriyel olarak da üretilebilmektedir. Fiberler elde edilmelerine göre doğal ve yapay olarak incelenmektedirler. Doğal fiberler bitki, mineral ve hayvan gibi doğal kaynaklardan üretilen liflerdir. Bu lifler kolaylıkla elde edilmelerine rağmen alkali ortamlarda parçalanabilme dezavantajına sahiptirler. Yapay fiberler, arzu edilen niteliklerde endüstriyel işlemlerle üretilen, çoğunlukla petrol kaynaklı sentetik polimerlerden elde edilen maddelerdir. Doğal fiberlere göre kimyasal tepkimelere karşı daha dayanıklılık göstermektedirler. Yapay fiberler, kolaylıkla elde edilmeleri ve düşük maliyetli olmaları sayesinde birçok sektörde olduğu gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında da kullanılmaktadırlar (Küçük, 2021).

Yapılan geoteknik alanındaki zemin stabilizasyonu çalışmalarında fiberlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Fiberler zeminde meydana gelen gerilmelere sahip oldukları yüksek çekme dayanımları ile engel olabilmektedirler (Küçük, 2021).

Killi zeminler taşıma gücü ve oturma problemlerinin karşılaşıldığı zeminlerdir. Bu zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini ıslah etmek için birçok iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır (Küçük, 2021). Bu yöntemlerden biri de zemine fiber donatı kullanılarak yapılan iyileştirmelerdir. Bu iyileştirme yöntemi ile çekme dayanımı yetersiz olan zeminlerde fiber donatılar kullanılarak zemine çekme dayanımı kazandırılmaktadır (Yılmaz, 2021).

#### **2.1.5.1. Mikro sentetik fiber donatıları.**

Sentetik fiber donatılar yapı elemanlarında çekme dayanımı ve aderansı sağlamada kullanılan malzemedir. Cam, plastik, tekstil malzemelerinden elde edilebilmekte ve çekme dayanımları gelişmiş olan bu malzemeler beton ve harçların imalatında kullanılmaktadırlar (Aydoğdu, 2019).

Betonda oluşan rötre ve yapısal çatlaklar betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Buna ilaveten betondaki çekme kuvvetlerinden de beton bünyesinde mikro çatlaklarda oluşmaktadır. Betonda oluşan içsel gerilmelere ve bu gerilmelerden oluşan çatlaklara engel olmak için sentetik fiber donatı kullanılmaktadır. Sentetik fiber donatılar farklı boyut, şekil ve türde üretilebilmektedirler (Aydoğdu, 2019).

Mikro sentetik fiber donatılar çok ince liflerden oluşmaktadırlar. Bu donatıların uzunlukları üretiminde kullanılan lifin malzemesine ve üretimi yapan firmaya göre değişiklik gösterebilmektedir. Mikro fiber sentetik donatı Şekil 4'te gösterilmektedir (Aydoğdu, 2019).



Şekil 4. Mikro sentetik fiber donatı (Aydoğdu, 2019).

#### 2.1.5.2. Makro sentetik fiber donatıları.

Makro sentetik fiberler, betonda üç boyutta homojen karışarak oluşabilecek çatlakları her noktada kontrol edebilen özelliğe ve geleneksel donatılara göre daha fazla kullanım ömrüne sahip olan donatılardır (Oral, 2020).

Geleneksel donatılar betonda çekme dayanımını artıran ve betona sağlamlılık kazandıran malzemelerdir. Geleneksel donatılar betonda gerekli çekme dayanımını sağlamalarına rağmen kimyasal özelliklerinden dolayı betonarme eleman içerisinde korozyona uğrayabilmektedir. Bu nedenle betonun çekme dayanımında azalmalara neden olmaktadır. Bu nedenle makro sentetik fiber donatılar enine donatı olarak betonda kullanılabilirler. Makro sentetik fiber donatılar korozyona uğramamaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde yapı ömrünün uzun kalmasını sağlamaktadırlar (Oral, 2020).

Mikro sentetik fiber donatılara kıyasla makro sentetik fiber donatılar daha kalın, daha uzun, yüzeyleri daha pürüzlü yapıdadır. Makro fiber donatıların pürüzlü yüzeye sahip olmaları betonda aderansı sağlamasına yardımcı olmaktadır. Mikro fiber donatıların birim ağırlıktaki lif sayısı makro fiber donatılara göre daha fazladır. Bu sayede mikro fiber donatılar beton içerisinde homojen karışabilmektedirler. Ancak makro fiber donatıların adedinin dayanımı mikro fiber donatılara göre daha fazladır. Bu özellikleri doğrultusunda makro fiberler beton içerisinde homojen karışması için daha fazla sürede karıştırma uygulanmalıdır (Aydoğdu, 2019).

Makro fiberler boyutları şekil vermeye uygun özellikte olduklarından farklı şekil ve ölçülerde imalat edilebilmektedirler. Üretiminde farklı malzeme çeşitleri kullanılabilir.

Betonlarda makro fiber donatıların kullanımı rötre çatlaklarının önlenmesini, eğilme ve sünme davranışının olumlu etkilenmesini, beton ve harçlarda yüklerin etkisi ile meydana gelebilecek çatlakların önlenmesini sağlamaktadır. Makro fiber donatılar basınç etkisinde olan yapı elemanlarının ve malzemelerinin içsel çekme kuvvetlerinden oluşan çatlaklara engel olmayı, çatlakların oluşmasıyla meydana gelebilecek dağılmaları önleyerek basınç dayanımlarının da iyileştirilmesini sağlar. Makro fiber donatıların şekline, kullanma miktarına, tekniğine ve cinsine bağlı olarak beton ve harçların özellikleri etkilenebilmektedir. Makro sentetik fiber donatı Şekil 5'te gösterilmiştir (Aydoğdu, 2019).



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

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### 3.1. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde kullanılan doğal malzeme, uçucu kül, alkali aktivatör ve fiber donatı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile malzemelerin kullanımında referans alınan standartlar hakkında bilgi verilmiştir.

#### 3.1.1. Doğal Malzeme

Deneyde kullanılan doğal malzeme Ordu il merkezinde bulunan bir alanda 2 m derinlikteki inceleme çukurundan sağlanmıştır. Alınan doğal malzeme deneye başlamadan önce 24 saat etüvde tamamen kurutulması sağlandıktan sonra elek analizi, likit limit ve plastik limit, tane yoğunluk, standart kompaksiyon, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. ASTM D 2487 standartlarına göre yapılan deney sonuçları ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına göre doğal malzemenin yüksek plastisiteli silt (MH) olduğu belirlenmiştir. Çalışmada yapılan deneyler ve bu deneylerin yapımında baz alınan ASTM standartları Tablo 14’de verilmiştir.

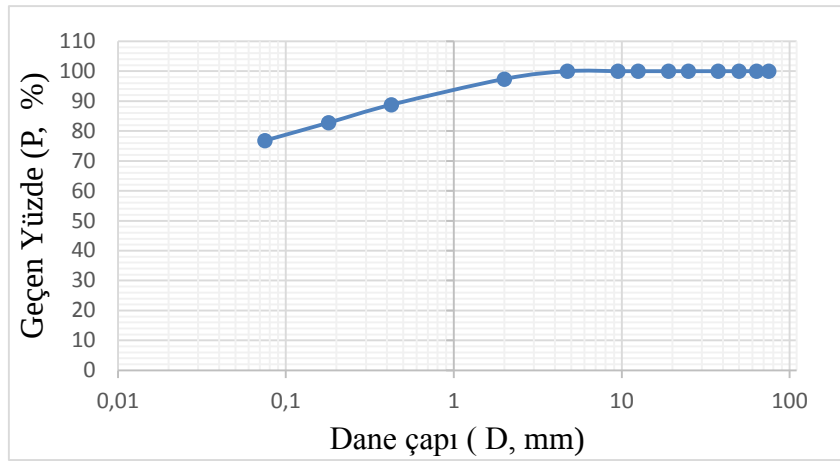
Tablo 14. *Çalışmada Yapılan Deneyler ve Standartları*

| Deneyin adı                     | Standart    |
|---------------------------------|-------------|
| Elek analizi                    | ASTM D 422  |
| Özgül ağırlık deneyi            | ASTM D 854  |
| Kıvam limitlerinin belirlenmesi | ASTM D 4318 |
| Standart kompaksiyon deneyi     | ASTM D 698  |
| Serbest basınç deneyi           | ASTM D 2166 |

Doğal zeminin mühendislik özellikleri Tablo 15’de verilmiştir. Doğal zeminin tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 6’da gösterilmiştir.

Tablo 15. *Doğal Zeminin Mühendislik Özellikleri*

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| USCS sınıflandırılması                        | MH    |
| Özgül ağırlık, $G_s$                          | 1.67  |
| Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{kmax}(Mg/m^3)$ | 1.367 |
| Optimum su içeriği, $w_{opt}(\%)$             | 24.6  |
| Likit limit, LL (%)                           | 60.7  |
| Plastik limit, PL (%)                         | 33.2  |
| Plastisite indisi, PI (%)                     | 27.5  |



Şekil 6. Doğal zeminin tane boyutu dağılımı eğrisi.

### 3.1.2. Uçucu Kül

Yapılan deneylerde puzolanik malzeme olarak kullanılan uçucu külün temini OYAK İSKEN İskenderun Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş. Sugözü Termik Enerji Santralinden sağlanmıştır. Kullanılan uçucu küle ait fiziksel özellikler Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

| Fiziksel özellikler                 |      |
|-------------------------------------|------|
| 45 µ elek üzeri (%)                 | 4,0  |
| Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.44 |
| Blaine (cm <sup>2</sup> /g)         | 2496 |
| Puzolanik aktivite                  | 15.8 |

Uçucu küllerin kimyasal yapısını büyük oranda ( $Al_2O_3$ ), ( $SiO_2$ ), ( $Fe_2O_3$ ) ve ( $CaO$ ) oluşturmaktadır. Az oranda  $MgO$ ,  $SO_3$ , alkali oksitler ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) de bulunan bileşenlerdir. Yanmamış karbon, fosfor, titanyum, mangan ve molibden uçucu külden bulunan eser bileşenlerin miktarları uçucu külün türüne göre değişkenlik göstermektedir (Şahin, 2019).

Uçucu külün kimyasal yapısında  $SiO_2$  % 25-60,  $Al_2O_3$  % 10-30,  $Fe_2O_3$  % 1-15 ve  $CaO$  % 1-40 oranlarında yer almaktadır. Uçucu külün yapısında bulunan diğer oksitlerden  $MgO$  miktarı en fazla % 5, alkali oksitlerin miktarı ( $Na_2O+K_2O$ ) % 5'in altındaki oranda değer almaktadır.  $SO_3$  miktarı ise % 2-2.5 arasında değer almakta ve bu oran kömürün yapısına ve proses şartlarına bağlı olarak % 10'a kadar çıkabilmektedir. TS EN 450-2 standartlarına göre  $SO_3$  oranı en fazla % 3'e kadar yükselebilmektedir. Kömürde yanmamış karbonu ve hidratların ve karbonatların bozulması sonucunda meydana gelen bağlanmamış su veya  $CO_2$  kaybını ifade etmek için kullanılan kızdırma kaybı, TS EN 450-2 standartlarına göre en fazla % 5 oranına kadar yükselebilmektedir. Uçucu küllerin kimyasal yapıları Tablo 17' de verilmiştir (Akyüncü, 2012).

Tablo 17. Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşenleri (Akyüncü, 2012)

| Bileşen                        | F Sınıfı Kül (%) (CaO < %10) | C Sınıfı Kül (%) (CaO > %10) |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 43.6-64.4                    | 23.1-50.5                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.6-30.1                    | 13.3-21.3                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.8-23.9                     | 3.7-22.5                     |
| CaO                            | 0.7-6.7                      | 11.5-29                      |
| MgO                            | 0.9-1.7                      | 1.5-7.5                      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0-2.8                        | 0.4-1.9                      |
| KK                             | 0.4-7.2                      | 0.3-1.9                      |

Uçucu küllerin kimyasal reaksiyonlarında hidrasyon ile oluşan ve dayanım kazanılmasını sağlayan C-S-H jellerini reaktif silis ve reaktif kireç oluşturmaktadır. Reaktif silis, puzolanik reaksiyonlarda alkali ortamda çözülürler. Bu bileşen uçucu kül yapısında amorf veya camsı fazda bulunmaktadır. Silisli bileşenler olan mullit ve kuvars ise inert ve kristalize olarak bulunmaktadır. Uçucu kül çeşidine bağlı olmaksızın reaktif silis miktarı en az % 25 oranında olmalıdır. Reaktif kireç oranı ise düşük kireçli küllerde % 10'un altında, yüksek kireçli küllerde % 10-15 arasında değer almaktadır (Akyüncü, 2012).

Kimyasal bileşenlere göre yapılan uçucu küllerin sınıflandırılmasında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları dikkate alınmaktadır. Standartlara göre bu bileşenlerin sınırları Tablo 18'de verilmiştir (Akyüncü, 2012).

Tablo 18. Uçucu Küllerin Standartlara Göre Kimyasal Değerleri (Akyüncü, 2012)

| Bileşenler (%)                                                                   | ASTM C 618 |        |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|--------|-------|-------|
|                                                                                  | TS EN 450  | TS 639 | F     | C     |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |            | > 70   | > 70  | > 50  |
| SO <sub>3</sub>                                                                  | < 3        | < 5    | < 5   | < 5   |
| Nemlilik                                                                         |            | < 3    | < 3   | < 3   |
| KK                                                                               | < 5        | < 10   | < 6   | < 6   |
| MgO                                                                              |            | < 5    |       |       |
| Alkaliler                                                                        |            | < 1.5  | < 1.5 | < 1.5 |
| Cl <sup>-</sup>                                                                  | < 0,10     |        |       |       |
| Serbest CaO                                                                      | < 1        |        |       |       |
| Reaktif SiO <sub>2</sub>                                                         | > 25       |        |       |       |

Uçucu küller yapısında bulunan silisyumdioksit (SiO<sub>2</sub>), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kalsiyum oksit (CaO) bileşenlerinin oluşturduğu kimyasal yapılarına göre ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları göz önünde bulundurularak sınıflandırılırlar. Uçucu küller ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıfı olarak gruplandırılırlar (Filazi, 2020);

a) F sınıfı uçucu küller, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > %70' den ve CaO < %10'un altında olduğu için düşük kireçli olan küllerdir.

b) C sınıfı uçucu küller,  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ ' den ve  $\text{CaO} > \%10$ ' dan fazla olduğu için yüksek kireçli olan küllerdir.

Sınıflandırmada her iki uçucu kül çeşidi de farklı puzolanik ve bağlayıcı özellik göstermektedir. Kalsiyum içeriği yüksek olan C sınıfı uçucu küller linyitin yakılmasıyla, kalsiyum içeriği düşük olan F sınıfı uçucu küller ise antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasıyla elde edilmektedir. F sınıfı uçucu küllere göre C sınıfı uçucu küllerin hem puzolanik hem de bir miktar bağlayıcı özelliği bulunmaktadır. F sınıfı uçucu küllerin ise bağlayıcılık özelliğe yoktur, puzolanik özellikleri bulunmaktadır. Aktif bileşik olarak C sınıfı uçucu küllerde kalsiyum alüminosilikat camı, F sınıfı uçucu küllerde ise silisli camı bulunmaktadır (Şahin, 2019).

Uçucu küller TS EN 197-1 standartlarına göre silisli (V) ve kalkersi (W) olarak sınıflandırılmaktadırlar. Silisli uçucu küller, yapılarında asıl reaktif olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , geride kalan kısmı da  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve diğer bileşenlerden oluşur. İnce toz halindeki küresel taneciklerin oluşturduğu silisli uçucu küller, puzolanik özelliklere sahiptirler. V sınıfı uçucu küllerde reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranı % 10'dan az, reaktif silis oranı % 25'ten fazla olmalıdır. Kalkersi uçucu küller de asıl reaktif olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , geride kalan kısmı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve diğer bileşenlerden oluşan, puzolanik ve hidrolik özelliğe sahip ince toz yapıdaki küllerdir. W sınıfı uçucu küllerde reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranı % 10'dan fazla, reaktif silis oranı da % 25'ten fazla olmalıdır. Her iki sınıf uçucu külün kızdırma kaybı % 5'ten küçük olmalıdır (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin mineralojik özellikleri yakılan kömürün içerdiği minerallere ve proses şartlarına bağlıdır. Uçucu küllerin mineralojik özellikleri külün sahip olduğu sınıfa göre değişkenlik göstermektedir. Küller camsı (kristalsız) ve kristal yapıya sahip bileşenlerden meydana gelmektedir. Sahip olunan mineralojik özellikler uçucu külün puzolanik özellikleri üzerinde etkisi göstermektedir. Camsı özellik uçucu küllerin reaktivitesinde oldukça fazla etkiye sahiptir (Akyüncü, 2012).

Düşük kireçli uçucu küllerde camsı faz,  $\text{SiO}_2$  açısından zengin ve yüksek oranda polimerize silisli veya alüminyum içeriğine sahip alüminosilikat bileşimi yapısına sahiptir. Silisli veya alüminosilikat bileşimleri su ve kalsiyum hidroksitle tepkime oluşturdıklarında uçucu külün puzolanik özellik elde etmesini sağlarlar (Akyüncü, 2012).

Yüksek kireçli uçucu küllerin aktif bileşenlerinde ise, silis ve kalsiyum alüminat camsı fazla birlikte kristalize faz da bulunmaktadır. Yüksek kireçli uçucu küller sahip olduğu bu aktif fazlar sayesinde hem puzolanik özellik hem de kısmen bağlayıcı özellik kazanmaktadır (Akyüncü, 2012).

### 3.1.3. Alkali Aktivatör

Geopolimer reaksiyonunun başlamasında alkali aktivatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında yapılan deneylerde aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltileri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan cam suyu olarak da ifade edilen sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ilgili firmalardan temin edilmiştir. Çalışmalarda 10 M'lık sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi hazırlamak için 1 litrelik dereceli kaba 400 gr NaOH tozuna saf su ilave edilmiştir. NaOH peletinin çözünmesini sağlanana kadar karıştırmaya devam edilmiştir. NaOH tanecikleri tamamen çözüldüğünde 1 litreye tamamlanacak şekilde saf su ilave edilmiştir. Hazırlanan çözeltinin soğuması için hava ile teması kesilip oda sıcaklığına bırakılmıştır. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörlere ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 19'da verilmektedir.

Tablo 19.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

| Özellikler                   | Sodyum hidroksit | Sodyum silikat            |
|------------------------------|------------------|---------------------------|
| Molekül formülü              | NaOH             | $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ |
| Molekül ağırlığı (g/mol)     | 40.02            | 181.92                    |
| Renk                         | Beyaz            | Beyaz                     |
| Ph                           | 13.2-14.12       | 11-12.63                  |
| Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ ) | 2.14             | 1.35-1.46                 |
| $\text{Na}_2\text{O}$ (%)    | -                | 8.85                      |
| $\text{SiO}_2$ (%)           | -                | 28.65                     |
| $\text{H}_2\text{O}$ (%)     | -                | 64.72                     |

### 3.1.4. Fiber Donatı

Deneylerde kullanılan mikro sentetik fiber donatılar, Kordsa firmasının imalat ettiği, Kratos Mikro Sentetik Fiber donatı olarak isimlendirilen fiber donatılardır. Yapılan deneylerde 3 mm ve 12 mm donatı uzunluğuna sahip mikro sentetik fiber donatılar kullanılmıştır. Kullanılan mikro fiber donatılara ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatıların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

| Fiber sınıfı       | Ham madde    | Özgül Ağırlık ( $\text{gr/cm}$ ) | Uzunluk (mm) | Çekme gerilmesi (MPa) | Alkali direnci | Korozyon direnci | Erime sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Fiber adedi/kg |
|--------------------|--------------|----------------------------------|--------------|-----------------------|----------------|------------------|----------------------------------------|----------------|
| EN 14889-2 Sınıf-I | Poliamid 6.6 | 1.14                             | 12           | 900                   | Çok İyi        | Çok İyi          | 260                                    | 111 Milyon     |

Tez çalışmasında kullanılan 3 mm uzunluğunda ve 12 mm uzunluğundaki Kratos mikro sentetik fiber donatı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Mikro sentetik fiber donatı. a) 3 mm, b) 12 mm

### 3.1.5. Numune Hazırlama

Alkali aktivasyonda kullanılacak olan alkali aktivatörlerden 10 M NaOH çözeltisi numuneler hazırlanmadan 24 saat öncesinde hazırlanmıştır. Alkali solüsyonun elde edilmesinde 1 L' lik dereceli kap içerisine 400 gr NaOH peleti koyulmuştur. Dereceli kap içerisine su eklenip NaOH tanelerinin tamamen çözülmesi sağlanana kadar karıştırılmıştır. NaOH tamamen çözülmesi ile dereceli kap içerisinde miktar 1l olana kadar su eklenip, kabın hava ile teması kesilerek soğumaya bırakılmıştır. Sodyum hidroksit ve su arasında gerçekleşen tepkime egzotermik olduğu için ısı açığa çıkar. Bu nedenle numune karışımları oluşturulmadan bir gün önce alkali solüsyon hazırlanıp bekletilerek oda sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır.

Numunelerin hazırlanmasında alkali aktivatörler kütlece %90, %80, %70, %60 ve %50 oranlarında NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri belirlenen miktardaki uçucu küle ilave edilerek en az 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Kütlece belirlenen oranda fiber donatı karışıma ilave edilerek elde edilen karışım belirlenen miktardaki zemin numunesi ile en az 10 dakika boyunca karıştırılmıştır.

Oluşan karışım 50 mm çapına ve 100 mm yüksekliğine sahip olan silindir numune kaplarına 3 kademeli olarak ve her kademede 4 tokmak vuruşu yapılarak kalıba yerleştirilip, standart proktor enerjisiyle sıkıştırılmıştır. Standart kompaksiyon enerjinin sağlanmasında Eşitlik 1 dikkate alınmıştır. Eşitlik 1'de N: Tabaka başına standart tokmanın düşüş sayısı, n: Tabaka sayısı, W: tokmak ağırlığı, h: tokmanın düşme yüksekliği, V: kalıp hacmini temsil etmektedir.

$$E = \frac{N n W h}{V} \quad (1)$$

Deney sonunda numunelerin su içeriğini kaybetmemesi için numuneler elastik film yardımıyla sarılmıştır. Hazırlanan numuneler 26 °C 'lık sıcaklığa ayarlanmış etüvde 7 gün ve 28 gün boyunca küre tabi tutulmuştur.

### 3.1.6. Serbest Basınç Dayanımı Deneyi

Serbest basınç deneyleri için 50 mm çapına ve 100 mm yüksekliğine sahip adet silindir numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7 gün boyunca 26 °C etüvde kür edilmiştir. Çalışmalarda her bir kütlece oran için 3 ve 6 adet numune hazırlanıp, değerlerin tespitinde ortalama değerler dikkate alınmıştır. Kür süreleri tamamlanan numuneler tek eksenli dayanım deneylerine tabi tutulmuştur. Standartlara uygun olarak hazırlanan numunelerin kür süresi sonucunda yapılan deneylerde numunelerin kırılması Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Tek eksenli basınç deneyine ait numune örnekleri.

### 3.1.7. X-ışını Difraktometresi (XRD) Deneyi

X-ışını difraktometresi, XRD olarak kısaltılmaktadır. X-ışını difraktometresi ile malzemelerin kristalografik özellikleri belirlenebilmektedir. Kristal yapıda olan inorganik malzemelerin sahip oldukları fazların tayin edilmesinde kullanılan XRD tahribatsız bir yöntemdir. XRD tekniği, kristal fazların kendisine ait olan atomik dizilimlerinden kaynaklı X-ışınlarını belirli bir düzene göre kırması işlemidir. Çalışma prensibi olarak malzeme üzerine gönderilen X-ışını ile ışınların kırılma ve dağılma verilerinin toplanması şeklinde ilerleyen işleyişe sahiptir (Balun, 2019).

Elektromanyetik dalgalardan oluşan çok kısa dalga boyuna sahip X ışınlarının incelemesi yapılacak olan numune üzerine gönderilip, kristal atomlarına çarpıtılması ile yansıtılmaktadır. X ışınlarının kullanılmasıyla kristal yapıları incelenen malzemelerin, kayaların ve polimerlerin mineralojik bileşimleri tanımlanmaktadır (Keskinkılıç, 2019).

Malzemenin sahip olduğu kristal yapısına bağlı olarak farklı açlarda ve şiddetlerdeki ışınlar ile hassas bir inceleme yapılabilmektedir. Bu teknik kullanılarak malzemelerin nitel ve

nicel özelliklerinin analizi yapılabilmektedir. Bu yöntemde numuneler parça ve toz halinde kullanılabilir (Balun, 2019).

Numuneler üzerinde yapılan XRD incelemeleri ile numunelerin sahip oldukları mineralojik özellikler analiz edilmiştir. Bu özelliklerin tanımlanması gerçekleşen kimyasal geopolimerizasyon reaksiyonunun ve elde edilen verilerin analiz edilmesi açısından önemlidir. XRD analizlerine göre malzemenin kristal ve amorf yapısının tayin edilmesi, bu yapıların kimyasal ve mineral bileşimlerinin belirlenmesi meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile ilgili önemli bilgiler vermektedir (Doğan, 2022).

### 3.1.8. X-ışını Floresans (XRF) Deneyi

Malzeme analiz tekniği olan X-ışını Floresans, XRF olarak kısaltılmaktadır. XRF tekniği ile birçok malzemenin bileşimleri hızlı bir şekilde ve birden çok elementin analizi yapılabilmektedir. Tahribatsız bir yöntem olduğundan tekrarlanabilir bir analiz yöntemidir. Bu teknik diğer analiz yöntemlerine göre maliyeti, doğruluğu ve hassasiyeti bakımından oldukça iyidir. (Keskin, 2019) Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal oksit MTA laboratuvarında belirlenmiştir. Uçucu külün XRF deneyi ile belirlenen oksit bileşik içeriği Tablo 21’ de verilmiştir.

Tablo 21. Uçucu Külün XRF Deneyi ile Belirlenen Oksit Bileşik İçeriği

| Oksit | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO | MnO | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SO <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> |
|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|-----|-----|-------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| %     | 18.5                           | 14.3 | 7.6                            | 2.1              | 2.7 | 0.1 | 1.2               | 0.3                           | 3.7             | 48.1             | 0.9              |

### 3.1.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, organik ve inorganik bileşiklerin analiz edilmesinde kullanılan yöntemdir. Bu yöntem ile moleküllerin ve bileşiklerin sahip oldukları bağlar hakkında bilgi edinilebilmektedir (Balun, 2019).

Maddenin meydana geldiği atomlar arasındaki bağların titreşiminden oluşan frekansları karşılayan absorpsiyon pikleri numunelerin tanımlanmasını sağlar. FTIR yöntemi kullanılarak yapılan moleküler bağ sınıflandırılması ile katı, sıvı, gaz veya çözelti olan organik bileşiklerin yapısını oluşturan bileşenler, bileşiklerin farklı olma durumunu, yapılarını oluşturan bağların durumu, bağlanma kısımları ve yapının alifatik veya aromatik olma durumu tayin edilebilir (Mancı, 2019).

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### 4.1. Araştırma Bulguları

Uçucu kül ile elde edilmiş olan geopolimer harçlara yapılan deneyler bu bölümde verilmiştir. Tez çalışmasında birleşik zemin sınıflandırmasına göre yüksek plastisiteli silt (MH) olduğu belirlenen zeminin uçucu kül, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki polipropilen lif karışımı ile elde edilen geopolimer malzemenin mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin sonuçları ve araştırma bulgularına yer verilmiştir.

#### 4.1.1. İstatistiksel Yaklaşım ile Deney Tasarımı

Çalışma kapsamında bağımsız değişkenler olarak belirlenen uçucu kül içeriği ve aktivatör içeriğinin yanıt olarak belirlenen serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin istatistiksel yöntem ile belirlenmesi amaçlanmıştır. İstatistiksel analiz yardımı ile maksimum serbest basınç dayanımı veren optimum miktardaki uçucu kül içeriği ve aktivatör miktarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ana amacı, lif içeriği, lif uzunluğu ve farklı lif uzunluk kombinasyonunun USC üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir. Bu nedenle, lif içeriği istatistiksel tasarımda üçüncü bir bağımsız değişken olarak kullanılmamış, söz konusu parametreler ayrı deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

Uçucu kül ve aktivatör içeriğinin serbest basınç dayanımına olan etkisinin belirlenmesi, aktivatör içeriği ve uçucu kül içeriği cinsinden serbest basınç dayanımını veren eşitliğin türetilmesi için gereken regresyon analizi Minitab 19 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada regresyon analizi için Kurucu (2022)'nin hazırladığı veri seti kullanılmıştır (Tablo 22). Deney tasarımının oluşturulmasında değişken aktivatör içeriği ve uçucu kül içerikleri dikkate alınarak hazırlanmış olan, 7 gün 26 C° kürde bekletilen, 50 mm çapında 100 mm yüksekliğindeki zemin numunelerin serbest basınç dayanımları belirlenerek deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tablo 22. Regresyon Analizinde Dikkate Alınan Deney Tasarımı (Kurucu, 2022)

|   | Bağımsız Değişkenler |                | Deneysel Sonuç         |
|---|----------------------|----------------|------------------------|
|   | X <sub>1</sub>       | X <sub>2</sub> | Y (kN/m <sup>2</sup> ) |
| 1 | 0.25                 | 0.1            | 0.04                   |
| 2 | 0.25                 | 0.1            | 0.05                   |
| 3 | 0.25                 | 0.1            | 0.053                  |
| 4 | 0.75                 | 0.1            | 0.25                   |
| 5 | 0.75                 | 0.1            | 0.14                   |
| 6 | 0.75                 | 0.1            | 0.08                   |

|    |       |      |       |
|----|-------|------|-------|
| 7  | 0.25  | 0.3  | 5.4   |
| 8  | 0.25  | 0.3  | 3.32  |
| 9  | 0.25  | 0.3  | 3.7   |
| 10 | 0.75  | 0.3  | 5.87  |
| 11 | 0.75  | 0.3  | 6     |
| 12 | 0.75  | 0.3  | 7     |
| 13 | 0.375 | 0.2  | 1.29  |
| 14 | 0.375 | 0.2  | 2.48  |
| 15 | 0.375 | 0.2  | 1.46  |
| 16 | 0.625 | 0.2  | 1.175 |
| 17 | 0.625 | 0.2  | 0.93  |
| 18 | 0.625 | 0.2  | 1.06  |
| 19 | 0.5   | 0.15 | 0.331 |
| 20 | 0.5   | 0.15 | 0.57  |
| 21 | 0.5   | 0.15 | 0.402 |
| 22 | 0.5   | 0.25 | 1.83  |
| 23 | 0.5   | 0.25 | 1.65  |
| 24 | 0.5   | 0.25 | 2     |
| 25 | 0.5   | 0.2  | 0.67  |
| 26 | 0.5   | 0.2  | 1.09  |
| 27 | 0.5   | 0.2  | 0.8   |
| 28 | 0.5   | 0.2  | 0.84  |
| 29 | 0.5   | 0.2  | 1.2   |

Kurucu (2022)'nin yapmış olduğu deney tasarım matrisi dikkate alınarak aktivatör içeriği ve uçucu kül içeriğinin ile numunelerin serbest basınç dayanımı arasında regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu suretle aktivatör ve uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımı arasında istatistiksel ilişki kurulmuş, serbest basınç dayanımına etki eden parametreler incelenmiştir. Deneysel tasarımda uçucu kül içeriği  $X_1$ , aktivatör içeriği ise  $X_2$ , katsayıları ile temsil edilmiştir. Söz konusu içerikler, Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) 'de belirtilen formüllere göre belirlenmiştir.

$$X_1 = \frac{W_{\text{Uçucu kül}}}{W_{\text{Zemin}}} \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{W_{\text{Aktivatör}}}{W_{\text{Zemin}} + W_{\text{Uçucu kül}}} \quad (3)$$

İstatistiksel analizler için veri elde etmek üzere üç faktörlü ( $\alpha = 0.5$  için) merkezi kompozit tasarım (CCD) kullanılmıştır. Bağımsız değişken miktarındaki değişiminin belirlenmesinde  $\alpha$  katsayısı belirleyici rol oynamaktadır. Üç faktörlü deney tasarımı, bağımsız

değişkenlerin alabileceği üç farklı değer durumunu dikkate almaktadır. Bu durumlar; alt ve üst sınırlar (-1 ve +1), merkez (0) ve alt ve üst sınır arasında kalan ara noktalar (-0.5 ve +0.5).  $\alpha$  katsayısının 0.5 olarak alınması merkez nokta ile sınır noktaların ortasındaki değerlerin deney tasarımında kullanılmasını sağlamaktadır. İstatistiksel analizlerde kullanılan bağımsız değişkenlerin merkezi noktalarının, üst ve alt sınırlarının kodlanmış ve gerçek değerleri Tablo 23'de verilmiştir.

Tablo 23. Deney Tasarımında Kullanılan Bağımsız Değişkenlerin Alt, Üst, Orta ve Ara Değerleri

| Bağımsız Değişkenler | Kodlanmış Değerler | X <sub>1</sub>  | X <sub>2</sub> |
|----------------------|--------------------|-----------------|----------------|
|                      |                    | Gerçek Değerler |                |
| Faktör düzeyleri     | -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           |

Değişkenlerin ilişkisinin doğrusal olduğu durumlarda lineer regresyon modeli kullanılabilirken, ilişkinin doğrusal olmadığı tespit edildiğinde değişkenlerde dönüşüm yoluna gidilebilmektedir (Yıldız, 2020). Box-Cox transformasyonu verilerin doğrusal bir regresyon modeline göre davranmasını sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir araçtır (Muhamad Amir, 2008). Verilerin ilişkisinin açıklanmasında modelde Box-Cox ( $\lambda=0.2$ ) üstel dönüşümüne gidilmiştir. Elde edilen modelin iyileştirilmesinde modele dahil edilen parametrelerden "geriye analiz" ile önemsiz olanlar ( $p>0.1$ ) ayrılmıştır. İstatistiksel modelin uygunluğu Tablo 24'de sunulan ANOVA ile tespit edilmiştir. Tablodan modellerin  $R^2$  değerlerinin 1'e oldukça yakın olduğu görülmektedir. Modellerin regresyon katsayıları nispeten yüksektir, bu da arzu edilen bir durumdur. Düzeltilmiş  $R^2$  ve tahmin edilen  $R^2$  değerleri arasındaki farkın 0.2'den küçük olması nedeniyle  $R^2_{pre}$ ,  $R^2_{adj}$  ile makul bir uyum içinde olduğu söylenebilir. ANOVA sonuçları, modelin p-değerinin ve F-değerinin sırasıyla 0,0001 ve 78,59'dan küçük olduğunu göstermektedir. Bu da modelin p ve F değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 24. Elde Edilen Regresyon Modeline Ait Veriler ve Varyans Analizi (ANOVA) ( $\lambda=0.2$ )

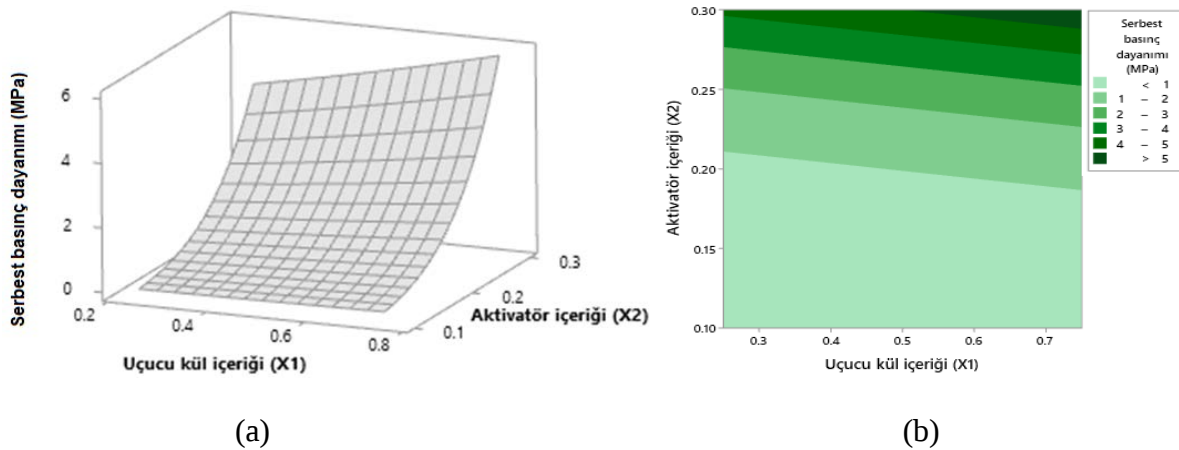
| Kaynak         | Serbestlik derecesi | Katsayı | Standart Hata | F-Value | P-Value |
|----------------|---------------------|---------|---------------|---------|---------|
| Regression     | 2                   | 0.1635  | 0.0549        | 200.67  | 0       |
| UK             | 1                   | 0.1825  | 0.0754        | 5.85    | 0.023   |
| A              | 1                   | 3.751   | 0.189         | 395.48  | 0       |
| Hata           | 26                  |         |               |         |         |
| Uyum eksikliği | 6                   |         |               | 4.87    | 0.003   |

|          |        |                  |                    |
|----------|--------|------------------|--------------------|
| Saf Hata | 20     |                  |                    |
| Toplam   | 28     |                  |                    |
|          | $R^2$  | Ayarlanmış $R^2$ | Tahminlenmiş $R^2$ |
|          | 93.92% | 93.45%           | 92.69%             |

Yapılan istatistiksel analiz sonucunda uçucu kül içeriği ve aktivatör içeriğine bağlı serbest basınç dayanımı veren eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$q_U = [+0.1254 + 0.235X_1 + 3.751X_2]^5 \quad (4)$$

Elde edilen modele göre uçucu kül ve aktivatör içeriği parametrelerinin serbest basınç dayanımı üzerindeki birleşik etkisi Şekil 9(a)'da görülmektedir. Şekil 9 (b)'de çalışma kapsamında oluşturulan model kullanılarak elde edilmiş kontur çizgileri grafiği görülmektedir. Şekil 9(a) ve 9(b)'nin incelenmesi sonucunda maksimum dayanımı veren aktivatör içeriği ve uçucu kül içeriği değerlerinin sırasıyla  $X_1=0.75-0.55$  ve  $X_2=0.3-0.28$  aralıklarında olduğu belirlenmiştir. Söz konusu değer aralığı Kurucu (2022)'nin belirlemiş olduğu optimum değerler olan  $X_1=0.75$  ve  $X_2=0.28$  değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmada maksimum serbest basınç dayanımını veren uçucu kül içeriği ( $X_1$ ) ve aktivatör içeriği ( $X_2$ ) ikilisi  $X_1=0.75$  ve  $X_2=0.28$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Regresyon analizi sonucunda oluşturulan modele ait (a) serbest basınç dayanımının 3 boyutlu yüzey grafiği, (b) Kontur çizgileri grafiği.

#### 4.1.2. Serbest Basınç Dayanımına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi

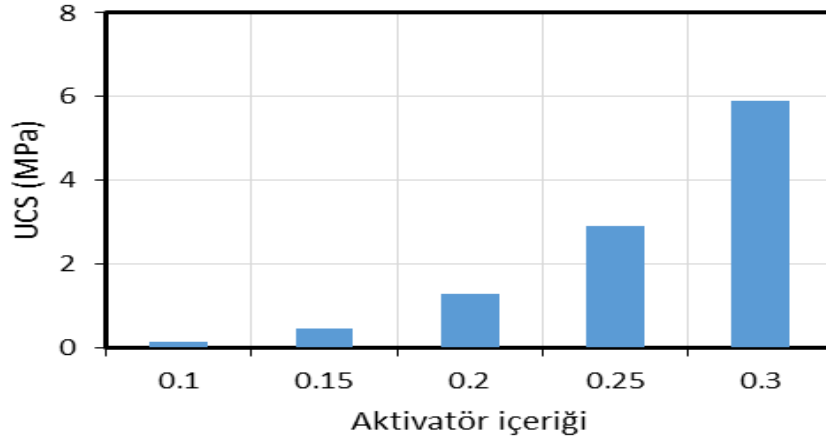
Literatürde geopolimer malzemelerin dayanımlarına Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O, Si/Ca oranlarının etki ettiği bilinmektedir. Öte yandan yüzeysel iyileştirme uygulamalarında numunelerin serbest basınç dayanımına sıkıştırma enerjisi, su içeriği gibi parametreler de etki ettiği bilinmektedir. Yapılan çalışma kapsamında geopolimerlerin katkı ile zemin

stabilizasyonu incelendiğinden su içeriği yerine aktivatör içeriği kullanılmıştır. Bu suretle aktivatör içeriği (kıvam), uçucu kül içeriği gibi kavramların yanında Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O, Si/Ca oranlarının da dayanım üzerindeki etkisi incelenmiştir.

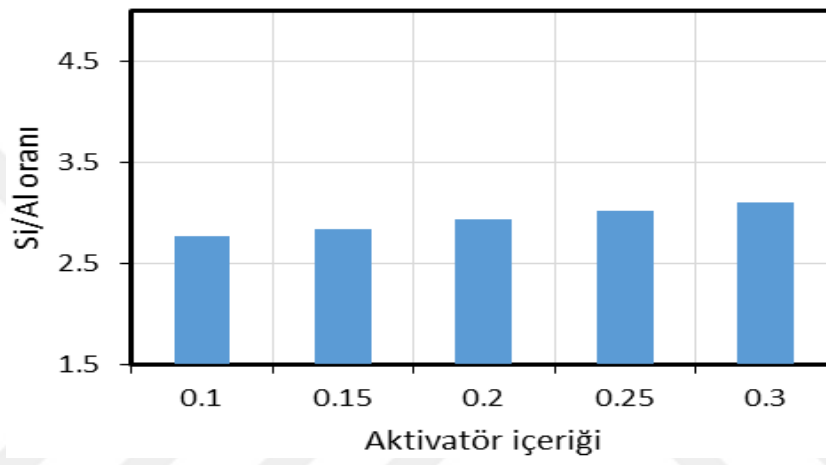
#### 4.1.2.1. Aktivatör içeriğinin etkisi.

Bu kısımda Eşitlik (3)'de tanımlanmış olan aktivatör içeriğinin (X<sub>2</sub>) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan uçucu külün XRF analiz sonuçları dikkate alınarak farklı aktivatör içerikleri için Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O oranları değerleri belirlenmiştir. Böylece aktivatör içeriğinin yanında Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O oranlarının serbest basınç dayanımına etkileri de incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda uçucu kül oranı (X<sub>1</sub>) 0.75, sodyum silikat-sodyum hidroksit oranı (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH) 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör içeriği (X<sub>2</sub>) 0.1 ile 0.3 arasında değişken olarak tanımlanmıştır. Şekil 10a'da farklı aktivatör içerikleri için hesaplanan serbest basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. Bu kısımda yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen Eşitlik (4) dikkate alınarak serbest basınç dayanımları farklı aktivatör içerikleri için hesaplanmıştır. İlgili grafikten artan aktivatör miktarının serbest basınç mukavemeti değerlerinde artışa sebebiyet verdiği görülmektedir (Şekil 10a).

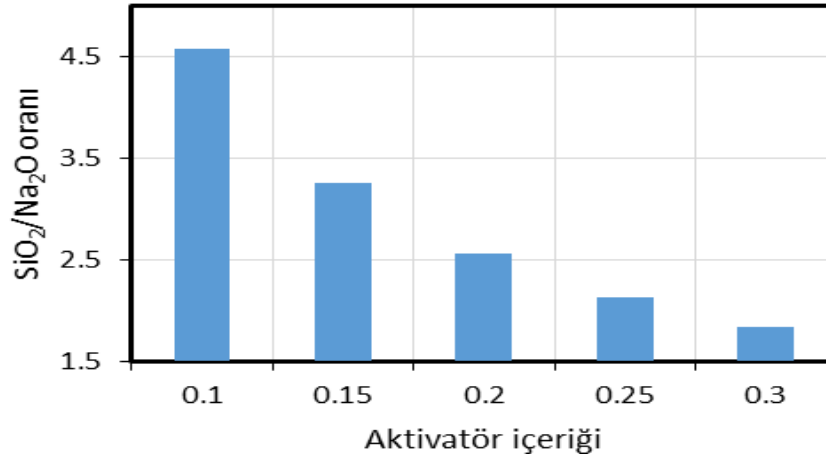
Şekil 10b ve 10c' de farklı aktivatör içerikleri için hesaplanan Si/Al ve SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O oranları görülmektedir. Geopolimer esaslı malzemelerde Si/Al oranı serbest basınç dayanımı üzerinde etkilidir (Binod Singhi, 2016). Şekil 10b'den değişen aktivatör içerikleri ile Si/Al oranının 2.77 ile 3.11 arasında değiştiği görülmektedir. Aktivatör içeriğinin düzenli olarak değiştirilmesi ile SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranlarının 4.58-1.85 arasında değer aldığı görülmektedir. Şekil 10a ve Şekil 10b'nin incelenmesi sonucunda aktivatör içeriğinin değişimi ile Si/Al oranı arasında büyük değişimler ortaya çıkmadığı görülmektedir. Ancak, düşük aktivatör içeriklerinde serbest basınç dayanımı değerinin ciddi derecede düştüğü aktivatör içeriğinin artmasına bağlı olarak 6 MPa civarına yükseldiği görülmektedir. Bu durum Si/Al oranının yanında kıvamın da dayanım üzerinde etkin olduğunu göstermektedir. Zira düşük aktivatör içeriği değerlerinde malzemenin Si/Al oranı 3'e yakın bir değerdedir. Bu durumda malzemenin dayanımına olumsuz etki eden unsurunun, yeterli olmayan sıvı içeriğine bağlı olarak numunelerdeki oluşan yerleşme bozuklukları (boşluklar) olduğu öne sürülebilir.



(a)



(b)



(c)

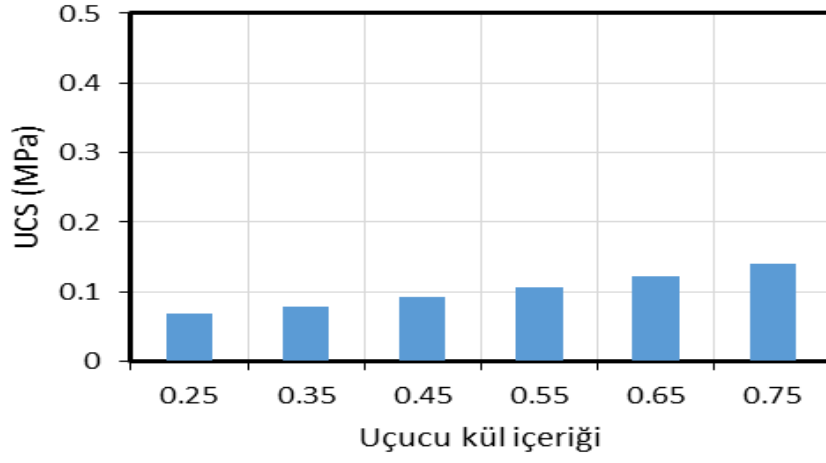
Şekil 10. (a) Farklı aktivatör içerikleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı değişimi.

#### 4.1.2.2. Uçucu kül içeriğinin etkisi.

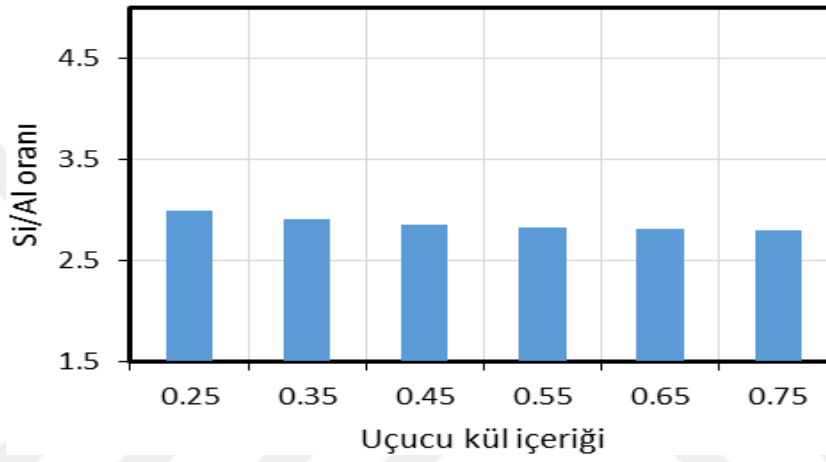
Sıkıştırma, iyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı üzerinde hayati bir rol oynar. Su içeriği de sıkıştırmayı etkileyen belirleyici faktörlerden biridir. Optimum değerin altındaki su içeriği, yetersiz sıkıştırmadan kaynaklanan boşluklara neden olabilir. Şekil 10'da verilen verilerin incelenmesi sonucunda düşük serbest basınç dayanımı değerlerinin yetersiz kimyasal bileşimden mi yoksa yetersiz sıkıştırmadan mı kaynaklandığı konusunda bir sonuca varmak zordur. Bu nedenle Şekil 11 ve Şekil 12'de iki farklı aktivatör içeriği ( $X_2=0.1$ ,  $X_2=0.3$ ) için karşılaştırma yapılmıştır.

Bu kısımda Eşitlik (3)'de tanımlanmış olan aktivatör içeriğinin ( $X_2$ ) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı aktivatör içeriği değeri için ( $X_1=0.1$  ve  $X_1=0.3$ ) uçucu kül içeriğinin serbest basınç dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Geopolimer esaslı malzeme üretiminde kullanılan uçucu külün XRF analiz sonuçları dikkate alınarak farklı uçucu kül içerikleri için Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O, oranları değerleri belirlenmiştir. Böylece Si/Al, SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O, Si/Ca oranlarının serbest basınç dayanımına etkileri de araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda sodyum silikat-sodyum hidroksit oranı (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH) 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Uçucu kül içeriği ( $X_1$ ) iki farklı aktivatör oranı için 0.25 ile 0.75 arasında değişken olarak tanımlanmıştır.

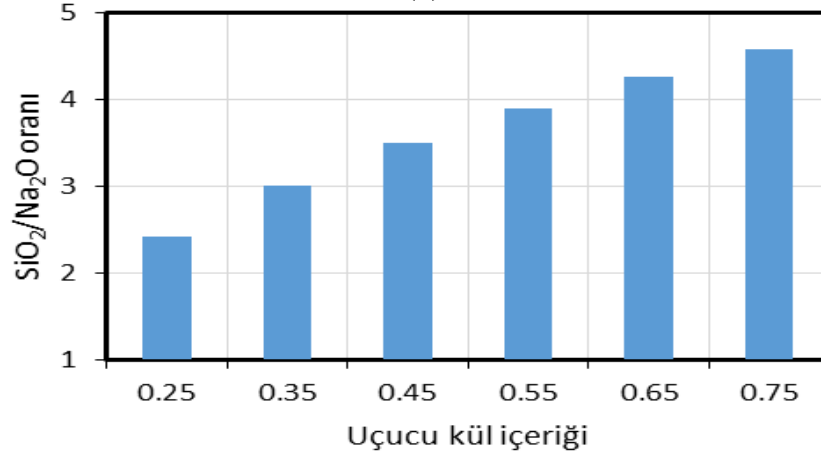
Şekil 11'de, nispeten düşük aktivatör içeriği için ( $X_2=0.10$ ) artan uçucu kül içeriği ile UCS, Si/Al oranı ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının değişimi sunulmaktadır. Bu seride alkali aktivatör içeriği zeminin optimum nem içeriğinden ( $X_1=\%10$ ) daha düşük tutulmuştur. Şekil 11a'dan artan uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Ancak bu değerlerin oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Şekil 11b'den artan uçucu kül içeriği ile Si/Al oranının 3.11 ile 2.77 arasında değiştiği görülmektedir. Serbest basınç dayanımını trendine zıt bir şekilde, Si/Al oranının artan uçucu kül değeri ile birlikte azaldığı görülmektedir. Aktivatör içeriğinin düzenli olarak değiştirilmesi ile SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranlarının 1.85 ile 4.58 arasında değer aldığı görülmektedir.



(a)



(b)

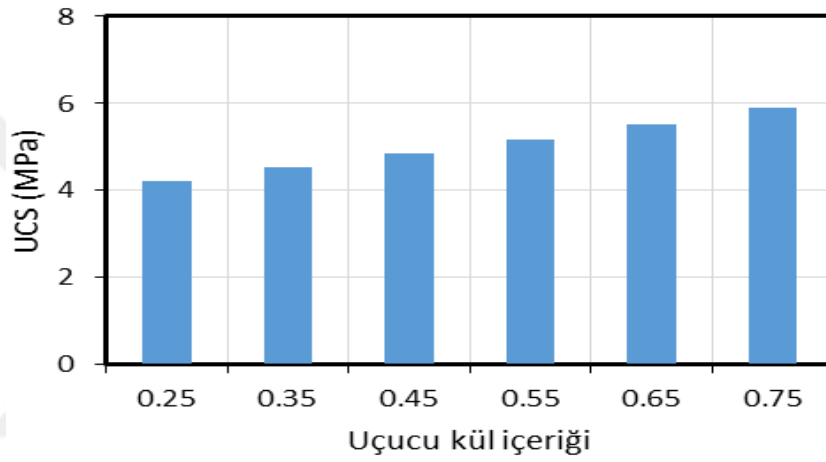


(c)

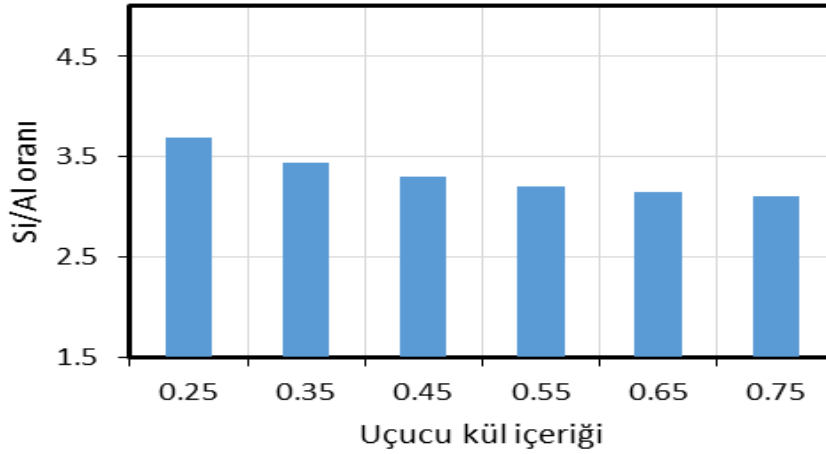
Şekil 11. (a)  $X_2=0.1$  için farklı uçucu kül içerikleri ile (a) Serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c) SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı değişimi.

Şekil 12'de, nispeten yüksek aktivatör içeriği için değişen uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımı, Si/Al oranı ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının değişimi sunulmaktadır. Bu deney serisinde alkali aktivatör içeriği toprağın optimum nem içeriğine yakın bir değer olarak

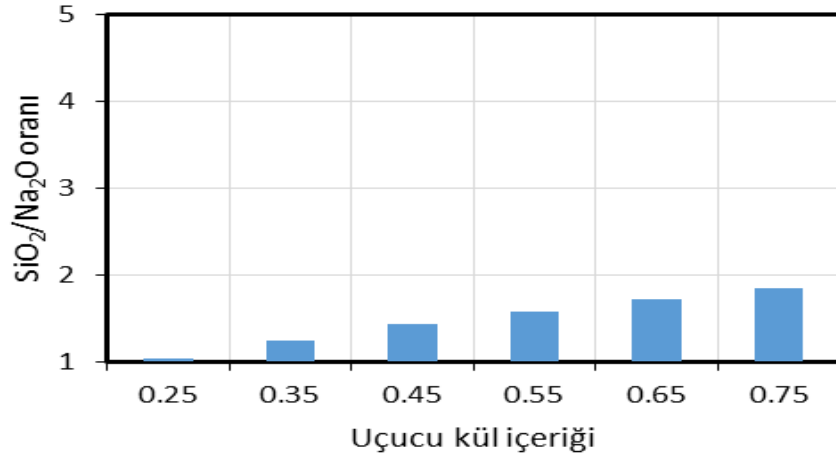
kullanılmıştır ( $X_1=0.30$ ). Şekil 12a, 12b ve 12c’de farklı uçucu kül içerikleri için hesaplanan serbest basınç dayanımı, Si/Al, ve SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O oranları görülmektedir. Şekil 12a’da artan uçucu kül içeriği ile birlikte serbest basınç dayanımı değerinin artış gösterdiği, serbest basınç dayanımının 4 MPa ile 6 MPa arasında değer aldığı görülmektedir. Şekil 12b’den değişen aktivatör içerikleri ile Si/Al oranının 2.77 ile 3.11 arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Aktivatör içeriğinin ise düzenli olarak değiştirilmesi ile SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının 4.58-1.85 arasında değer aldığı görülmektedir (Şekil 12c). Şekil 12a ve Şekil 12b’nin incelenmesi sonucunda uçucu kül içeriğinin değişimi ile Si/Al oranı arasında büyük değişimler ortaya çıkmadığı görülmektedir. Ancak, uçucu kül içerikleriyle serbest basınç dayanımı değeri birbirleri ile orantılı olarak değişim gösterdiği görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 12. (a)  $X_2=0.3$  için farklı uçucu kül içerikleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c)  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı değişimi.

Şekil 11 ve Şekil 12'nin incelenmesi sonucunda uçucu kül içeriğinin değişimi ile Si/Al oranı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ancak, aktivatör içeriğinin serbest basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu açıktır. Optimum su içeriğinden düşük aktivatör içeriklerinde serbest basınç dayanımının 0.07 MPa ile 0.15 MPa aralığında kalması, optimum su içeriğine yakın aktivatör oranında ise serbest basınç dayanımının 4 MPa ile 6MPa arasında değer alması diğer parametrelerin yanı sıra kıvamın da serbest basınç dayanımı üzerinde etkili bir parametre olduğunu göstermektedir.

#### 4.1.2.3. NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> oranının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Çalışmanın bu kısmında, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) oranlarının serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Farklı aktivatör oranlarında hazırlanan aktivatör katkılı karışımların deneylerden elde edilen dayanımları Tablo 25'de verilmiştir.

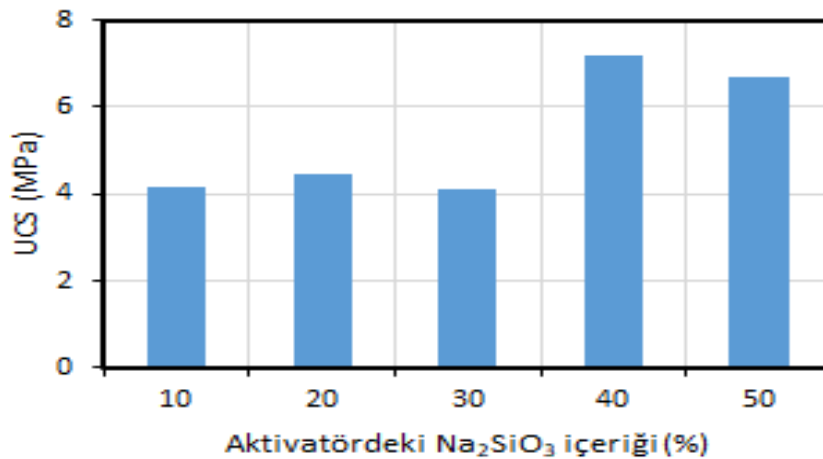
Tablo 25. Farklı Aktivatör İçerikleri İçin Elde Edilmiş Olan Serbest Basınç Dayanımı Değerleri

| Aktivatör içeriği | UCS (MPa) |
|-------------------|-----------|
| %50SH- %50SS      | 6.68      |
| %60SH- %40SS      | 7.20      |
| %70SH- %30SS      | 4.12      |
| %80SH- %20SS      | 4.44      |
| %90SH- %10SS      | 4.14      |

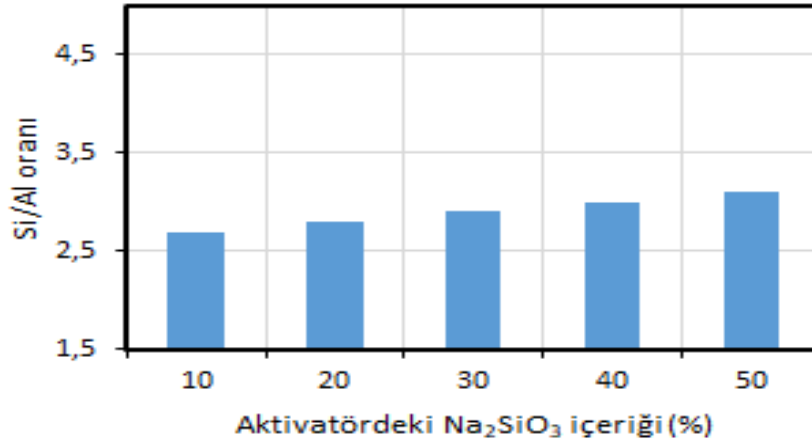
Çalışmanın bu kısmında beş farklı aktivatör oranı ile toplam 15 adet numune hazırlanmıştır. Aktivatör oranları 50SH-50SS (%50 sodyum hidroksit-%50 sodyum silikat),

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) içeriklerine sahiptirler. Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre 7 günlük deney sonucunda maksimum dayanımı 60SH-40SS numunesi vermiştir. 60SH-40SS numunesinin dayanımı  $7201,351 \text{ kN/m}^2$  olarak tespit edilmiştir. 7 gün kürlenmiş numunelerde sodyum hidroksit oranının aktivatör içerisinde artırılması ile %60 sodyum hidroksit-%40 Sodyum silikat oranına kadar serbest basınç dayanımında artış görülmektedir. Bu değerden sonra serbest basınç dayanım değerleri artan sodyum hidroksit değeri ile azalma eğilimine girmektedirler Farklı aktivatör oranlarında hazırlanan, 7 gün kürlenmiş numunelere yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 13a’da görülmektedir. Sodyum silikat oranı değişimine bağlı olarak hesaplanan  $\text{Si}/\text{Al}$  ve  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranlarının değişimi sırasıyla Şekil 13b ve 13c’de görülmektedir.

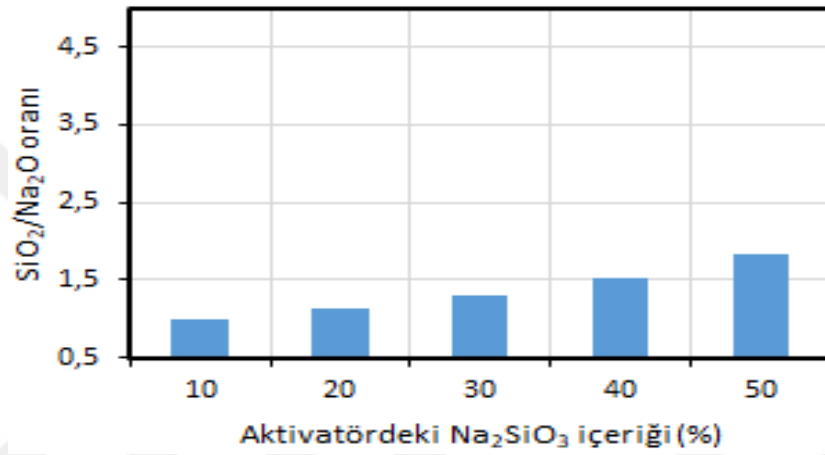
Şekil 13b’den aktivatördeki değişen  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içerikleri ile  $\text{Si}/\text{Al}$  oranının 2.77 ile 3.11 arasında değiştiği görülmektedir. Aktivatördeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriğinin düzenli olarak değiştirilmesi ile  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranlarının 4.58-1.85 arasında değer aldıkları görülmektedir. Şekil 13a incelenmesi sonucunda aktivatördeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriğinin % 40 ve % 50 olduğu oranlarda büyük değişimlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 13b’nin incelenmesi sonucunda aktivatördeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriğinin değişimi ile  $\text{Si}/\text{Al}$  oranı arasında büyük değişimler ortaya çıkmadığı görülmektedir. Aktivatördeki  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriğinin % 40 - % 50 bandına gelmesi ile  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranının ideal seviyeye geldiği görülmektedir.



(a)



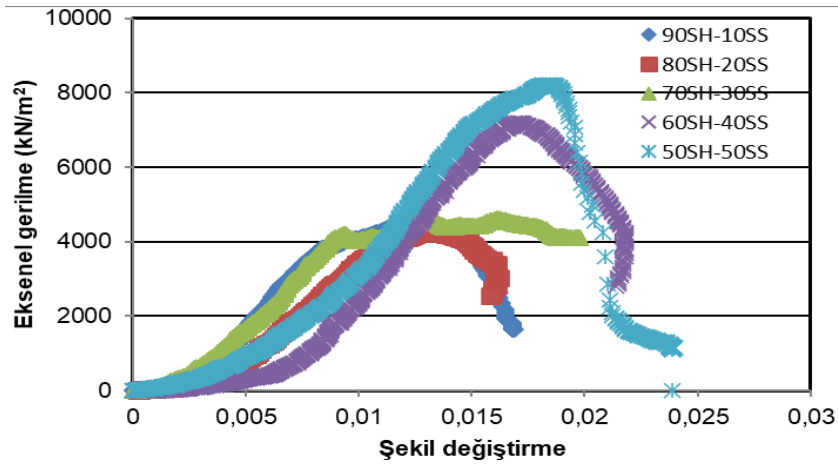
(b)



(c)

Şekil 13.  $X_1=0.75$ ,  $X_2=0.3$  için farklı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yüzdeleri ile (a) serbest basınç dayanımının değişimi, (b) Si/Al oranı değişimi, (c)  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı değişimi.

Tek eksenli basınç deneyi sonucunda farklı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içerikleri için elde edilmiş gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 14’de verilmiştir. Buna göre artan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oranı ile malzeme dayanımına paralel olarak sünekliği de artmaktadır. Maksimum dayanım ve süneklik 50SH-50SS ve 60SH-40SS kodlu aktivatör karışımlarında elde edilmiştir.

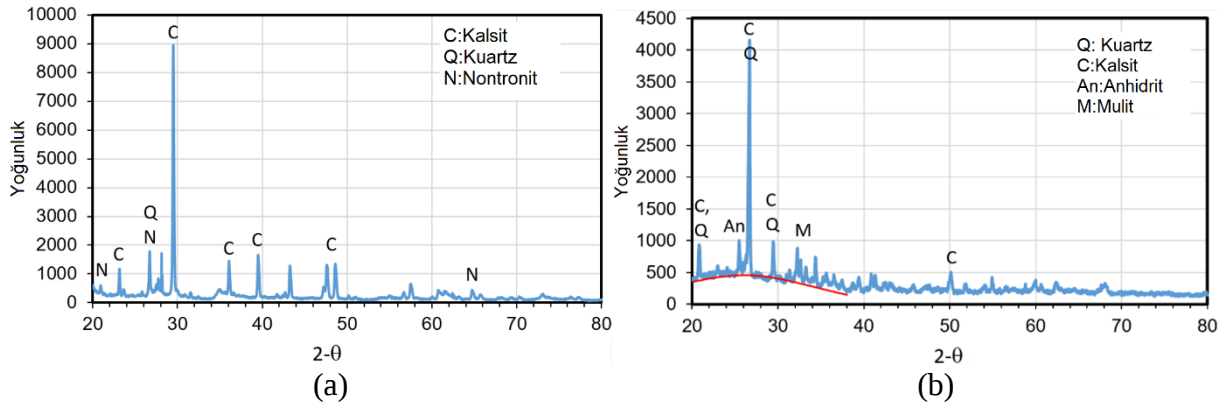


Şekil 14. Tek eksenli basınç deneyi sonrası farklı aktivatör oranları için elde edilen yük-deplasman eğrileri.

#### 4.1.3. Optimum Katkı Oranı ile Hazırlanmış Numunenin karakterizasyonu.

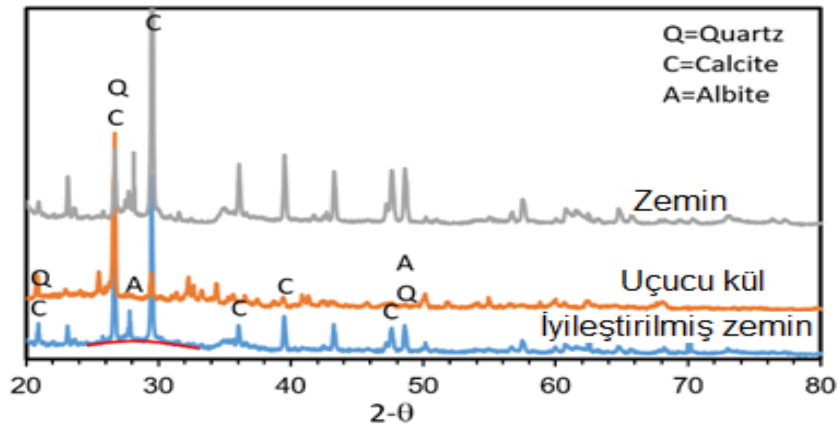
Bu bölümde, optimum katkı miktarı dikkate alınarak iyileştirilen geopolimer esaslı malzemenin karakterizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda geopolimer esaslı reaksiyon ürünlerini doğrulamak için zemin, uçucu kül ve iyileştirilmiş zemin numuneleri üzerinde X-ışını difraktometresi (XRD) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ve (FT-IR) analizleri yapılmıştır. CSH, CAH ve NAH gibi bileşikler, geopolimer reaksiyonlar nedeniyle sentezlenmesi beklenen olası kimyasal yapılardır. Değişen aktivatör içeriği ve uçucu kül içeriği ile serbest basınç dayanımlarında meydana gelen dikkate değer fark, iyileştirilen zeminde zemin taneleri arasında geopolimer jel sentezi oluşumu hakkındaki hipotezi desteklemektedir. Yapılan karakterizasyon ile söz konusu hipotezin deneysel analiz yöntemleri ile desteklenmesi amaçlanmıştır.

Zemine uçucu küle ve iyileştirilmiş zemine ait XRD deseni Şekil 15’ de sunulmuştur. Şekil 15(a)’ da sunulan zemine ait XRD deseninden kalsit kuvars ve nontronitin zemini oluşturan belli başlı mineraller olduğu görülmektedir. Bunun yanında keskin piklerin varlığı zemin içerisinde bulunan, kimyasal tepkimeye girmesi çok zor olan kristal yapıların varlığını işaret etmektedir. Şekil 15(b)’ de verilen uçucu küle ait XRD deseninden kuvars, kalsit, mulit ve anhidrit minerallerinin malzeme içerisindeki ana unsurlar olduğunu göstermektedir.  $2\theta=20^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında kırmızı renkli yay ile vurgulanan geniş tümsek, külün amorf yapısını göstermektedir.



Şekil 15. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelere ait XRD desenleri (a) Zemin numunesi, (b) Uçucu kül.

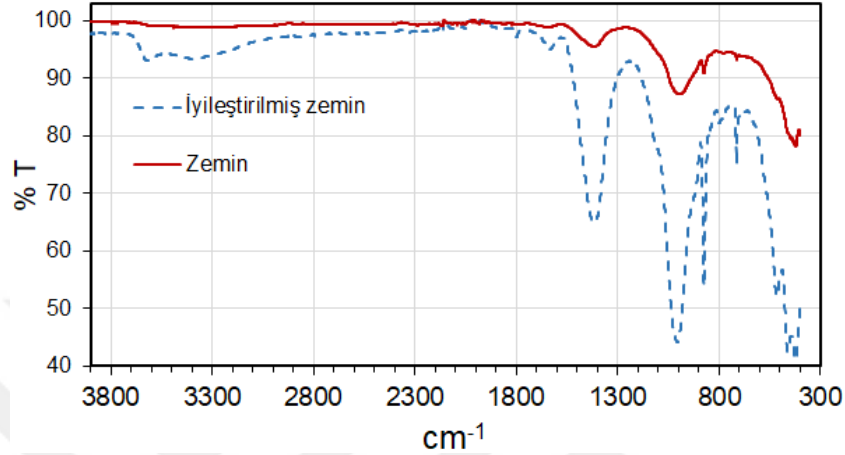
Şekil 16’ da iyileştirilmiş zemine ait XRD deseni uçucu kül ve zemin numunesine ait XRD desenleri ile karşılaştırılmıştır. Geopolimerizasyon için oluşması beklenen CAS ve NASH fazlarının varlığı  $2\theta=28^{\circ}$ - $30^{\circ}$  arasındaki hafif tümsek ile açıklanabilir. Bunun yanında  $2\theta=30^{\circ}$ ’deki pik CASH ve CSH fazları ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte Şekil 15’ de zemin numunesine ve iyileştirilmiş zemin numunesine ait XRD desenlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Gerek uçucu kül gerekse zemin numunesine ait desenlerde keskin pikler kristal yapıli minerallerin varlığını işaret etmektedir. Söz konusu piklerin iyileştirilmiş zemin numunesine ait XRD deseninde de görülmesi bu kristal yapıli minerallerin herhangi bir reaksiyona girmedigini göstermektedir. Geopolimerlerle ilişkilendirilen pikler, zemin numunesinden gelen kuartz, kalsit gibi minerallere ait pikler ile örtüşmektedir. Bu nedenle, zeminin ve stabilize edilmiş zeminin XRD piklerinde dikkate değer bir değişiklik olmamış gibi görünmektedir. Öte yandan, uçucu külün XRD modelinde CaO içeren fazlarla ilişkili pikler, iyileştirilmiş zemin modelinde belirgin değildir. Yok olan pikler, bileşiğin hidrasyon ürünlerine dönüşmesiyle açıklanabilir.



Şekil 16. Zemin, uçucu kül ve iyileştirilmiş zemine ait XRD kırınimleri.

İyileştirilmiş zemin numunelerinde geopolimerik jel oluşumunun incelenmesi adına kimyasal bağları araştırmak üzere Fourier dönüşümü kızılötesi (ATR-FTIR) spektroskopisi

kullanılmıştır. Şekil 17 zemine ve iyileştirilmiş zemine ait FTIR spektrumlarını göstermektedir. Buna göre iyileştirilmiş zemine ait kırınımlardaki yeni piklerden geopolimerizasyon sonucu farklı kimyasal bağların oluştuğu görülmektedir. Geopolimerizasyon için  $850\text{ cm}^{-1}$  ile  $1200\text{ cm}^{-1}$  arasındaki bant parmak izi bölgesi olarak nitelendirilebilir (T. Revathi, 2018) (H.A. Abdel-Gawwad, 2016).  $750\text{ cm}^{-1}$  ile  $800\text{ cm}^{-1}$  bant aralığındaki pik amorf yapıli camsi yapı ile yüksek miktardaki Al atomları ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan bağ yapısını temsil etmektedir.



Şekil 17. Zemin, uçucu kül ve iyileştirilmiş zemine ait XRD kırınımları.

Silisyum ile oksijen arasındaki bağ, Si-O-Si alüminyum-oksijen-silisyum atomları arasındaki bağ Al-O-Si yapısı  $557\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik ile açıklanabilir (Peter Duxson, 2008) (Erich D. Rodríguez, 2013). Si-O-Si bağları arasındaki titreşim yaklaşık  $463\text{ cm}^{-1}$  bandındaki pikler ile ilişkilendirilebilir (T. Revathi, 2018). FTIR sonuçlarından, belirlenen atomik bağların geopolimer jel oluşumu için uygun olduğu sayını güçlendirmektedir (Akyüncü, 2012).

#### 4.1.3.1. 3 mm uzunluğundaki lif katkısının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi.

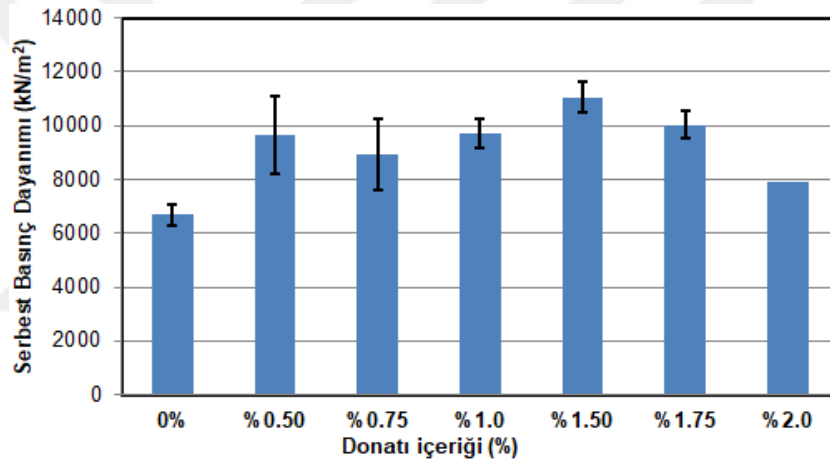
Çalışmanın bu kısmında uçucu külün aktifleştirilmesi için, kütlece %50-%50 oranında 10M NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltileri karışımı kullanılmıştır. Optimizasyon bölümünde elde edilen optimum uçucu kül içeriği ve optimum alkali aktivatör içerikleri kullanılarak geopolimer harç hazırlanmıştır. 3 mm uzunluğundaki lifler hazırlanan karışıma kütlece % 0, % 0.50, % 0.75, % 1.0, % 1.50, %1.75, % 2.0 oranlarında eklenmesi sureti ile hazırlanan numunelere serbest basınç dayanımı testi uygulanmıştır.

Şekil 18a' değişen 3 mm propilen fiber lif katkısının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre 28 günlük deney sonucunda 3 mm propilen fiber lif katkısını % 1.50 oranında içeren numune  $11000\text{ kN/m}^2$  değeri ile maksimum dayanımı vermiştir. Şekil 18a'dan artan donatı içeriği ile %1.50 değerine kadar numunelerin serbest basınç dayanımının artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu

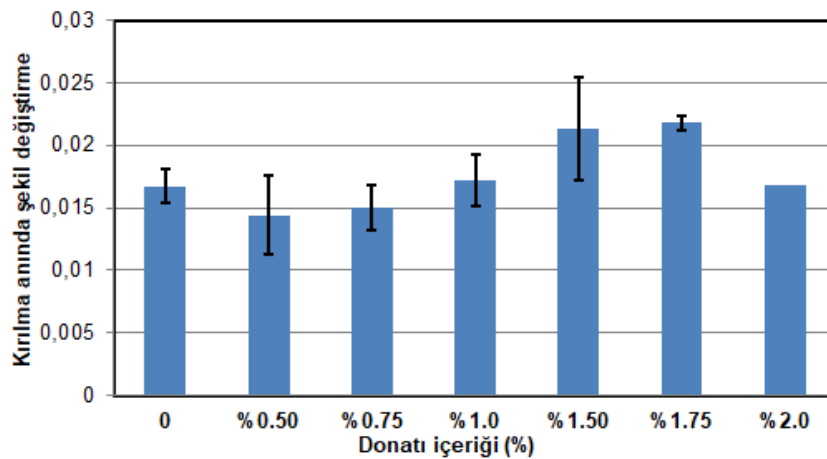
değerden sonra ise artan donatı içeriği ile numunelerin serbest basınç dayanımı azalma trendine girmektedir.

Şekil 18b’de fiber katkının kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu kısımda, 3 mm propilen fiber lif içeriği % 1.75 olan numunede kırılma anında maksimum şekil değiştirme gözlenmiştir. Artan donatı içeriği ile 0-%0.75 aralığında fiber lif katkısının kırılma anındaki şekil değiştirme üzerinde dikkate değer bir katkısı görülmemiştir. Ancak %1.00-%1.75 aralığında fiber katkının artması ile kırılma anında şekil değiştirme değerleri yükselmiş, %1.75 değerinden sonra ise azalmıştır.

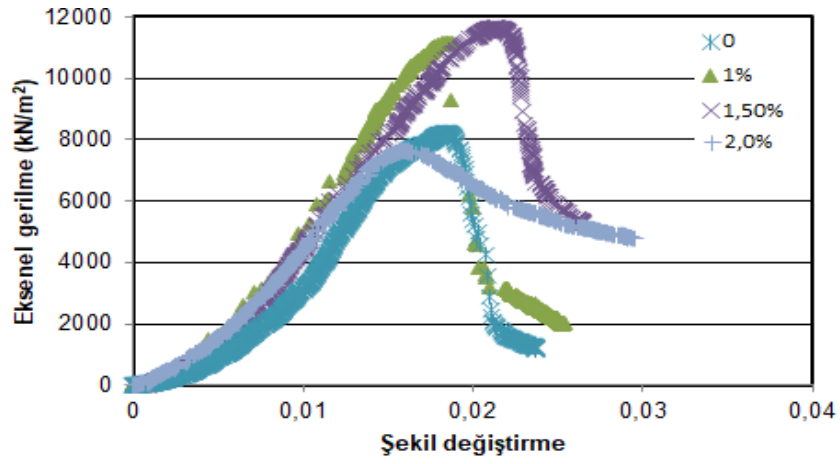
Fiber katkının numunenin sünekliği üzerindeki etkisi Şekil 18c üzerinde daha anlaşılır şekilde görülmektedir. Şekilde serbest basınç demeylerinden elde edilen eksenel gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin donatı ilevesi ile değişimi görülmektedir. Buna göre eğrilerden, 3 mm uzunluğundaki donatı ilavesi ile süneklik davranışının bir miktar arttığı görülmektedir.



(a)



(b)



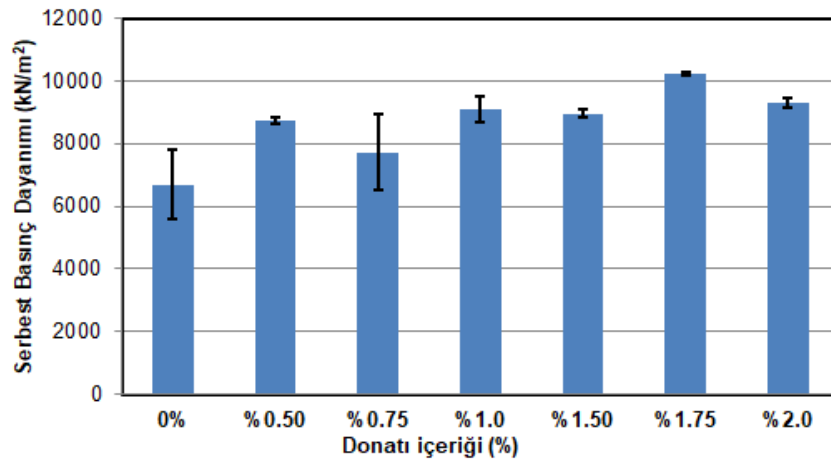
(c)

Şekil 18. 3 mm uzunluğundaki lif katkısının (a) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) Kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi.

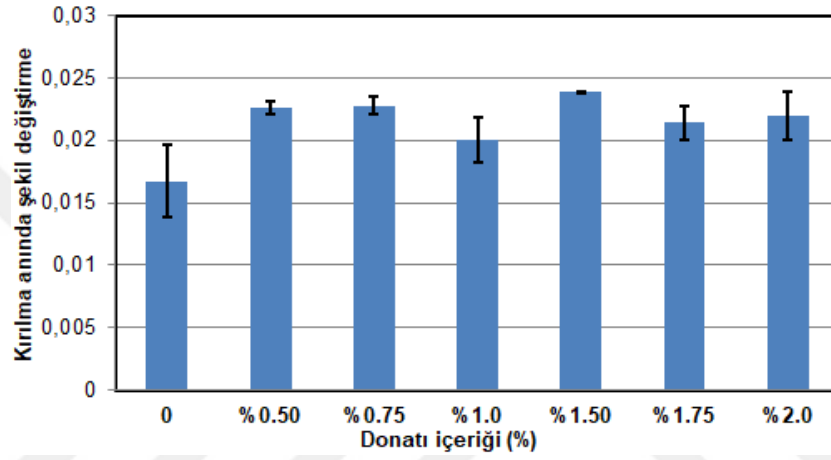
#### 4.1.3.2. 12 mm uzunluğundaki lif katkısının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi.

Çalışmanın bu kısmında uçucu külün aktifleştirilmesi için, kütlece %50-%50 oranında 10M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri karışımı kullanılmıştır. Optimizasyon bölümünde elde edilen optimum uçucu kül içeriği ve optimum alkali aktivatör içerikleri kullanılarak geopolimer harç hazırlanmıştır. 3 mm uzunluğundaki lifler hazırlanan karışıma kütlece % 0, % 0.50, % 0.75, % 1.0, % 1.50, %1.75, % 2.0 oranlarında eklenmesi sureti ile hazırlanan numunelere serbest basınç dayanımı testi uygulanmıştır.

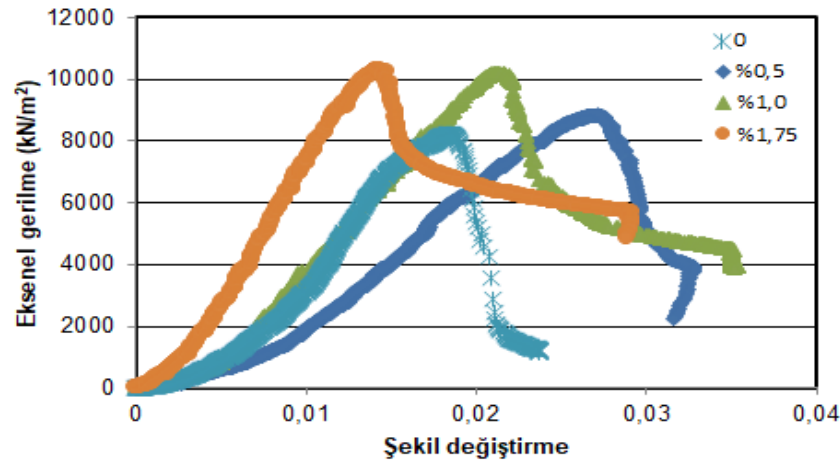
Şekil 19a'da değişen 12 mm propilen fiber lif katkısının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. 28 gün kürlenmiş numunelere uygulanan serbest basınç dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre yaklaşık 10000 kN/m<sup>2</sup> dayanım değeri ile maksimum dayanımı % 1.75 oranında fiber lif katkısı içeren numunelerin verdiği tespit edilmiştir. % 1.75 oranına kadar numunelerde artan fiber içeriğinin serbest basınç dayanımında artışa sebep olduğu, bu değerden sonra ise düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Fiber donatı içeriği ile kırılma anında şekil değiştirme arasındaki ilişki Şekil 19b'de görülmektedir. Buna göre 12 mm uzunluğundaki lif içeriğinin kırılma anındaki şekil değiştirme üzerinde dikkate değer bir etkisinin olduğu görülmektedir. Kırılma anında maksimum şekil değiştirme değerinin, %1.50 içeriğindeki fiber katkıları ile sağlandığı belirlenmiştir. Şekil.9c'de farklı donatı içeriklerindeki numunelere ait eksenel gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Buna göre şekilden, artan donatı oranı ile sünekliğin arttığı görülmektedir.



(a)



(b)

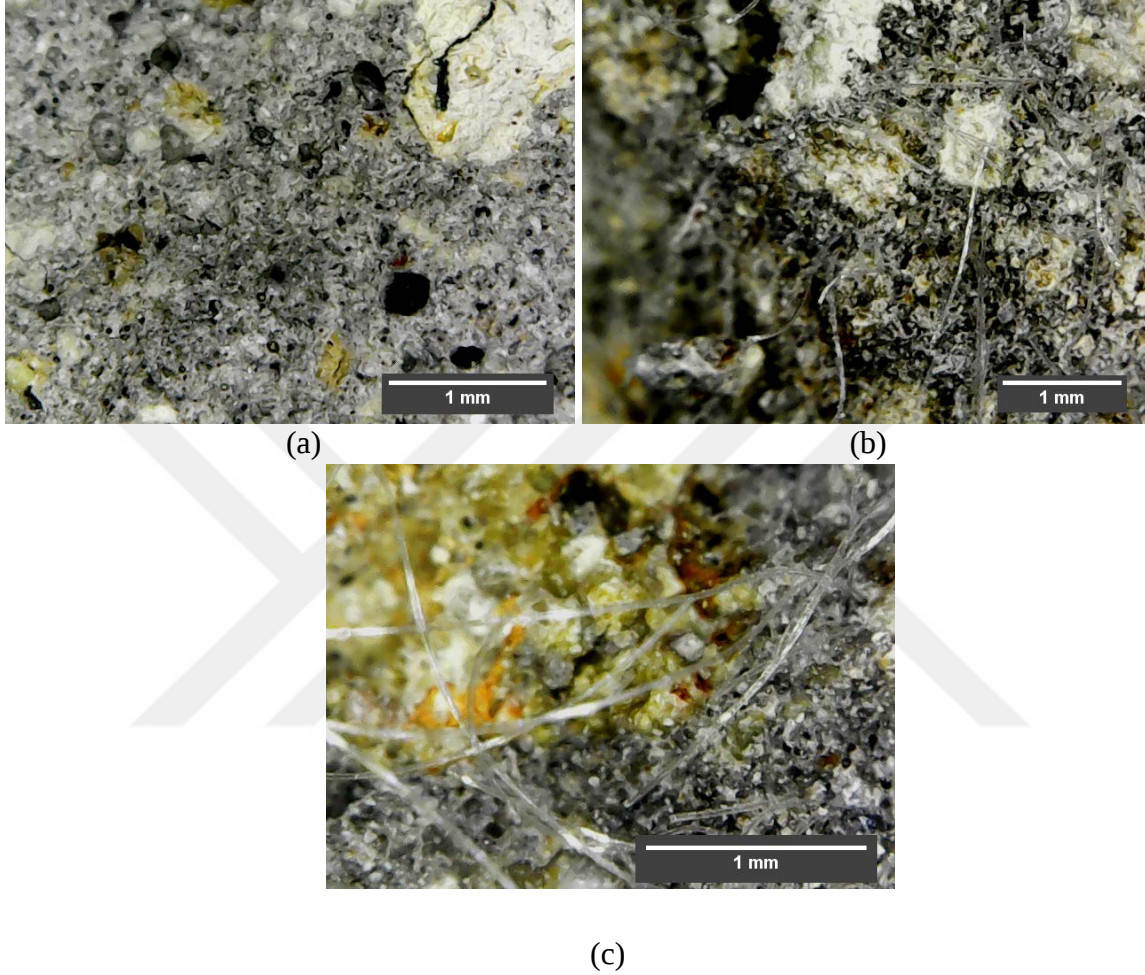


(c)

Şekil 19. 12 mm uzunluğundaki lif katkısının (a) serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) Kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi.

Şekil 20' de iyileştirilmiş zemin numunelerinin dijital mikroskop ile elde edilmiş mikro boyutlu görüntüleri verilmiştir. Geopolimer katkı malzemesi kullanılarak iyileştirilmiş zeminin görüntüsü Şekil 20(a)'da göstermektedir. İyileştirilmiş zemin yapısının heterojen yapıya sahip olduğu Şekil 20(a)' da gözlenmektedir. Alkali aktif bağlayıcılarla reaksiyona giren zemin ve

topaklanmış zemin heterojen yapıyı oluşturan iki ana bileşendir. Topaklanmış zemin kısımlarında oluşan çatlaklar, zeminin zayıf kısımlarında meydana gelmektedir. Stabilize zemindeki fiber katkıların dağılımı Şekil 20(b) ve 20(c)' de verilmektedir. Geopolimer reaksiyonunda fiber katlılar ortama dağıldığı ve zeminin topaklanan kısımlarında fiber katkı ile etkileşimde olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 20. (a) Geopolimer katkı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü, (b) Geopolimer katkı ve 3 mm uzunluğundaki donatı karışımı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü, (c) Geopolimer katkı ve 12 mm uzunluğundaki donatı karışımı ile iyileştirilen zemine ait mikroskop görüntüsü

#### 4.1.3.3. 3mm-12mm uzunluğundaki lif kombinasyonlarının iyileştirilen zeminin mekanik özelliklerine etkisi.

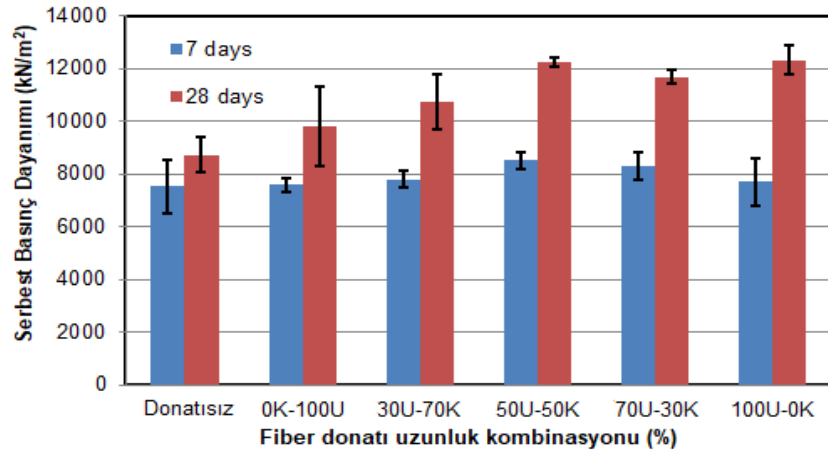
Çalışmanın bu kısmında 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatı kombinasyonlarının serbest basınç dayanımı, kırılma anındaki şekil değiştirme, gerilme-şekil değiştirme ve sekant modülü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu aşamada, %1.75'lik donatı oranı ve optimum uçucu kül-alkali aktivatör içeriği dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır. Sabit donatı oranı içerisindeki 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki donatı miktarlarının değiştirilmesi suretiyle uzunlukça hibrit donatı etkisi incelenmiştir. Numuneler; donatısız, %0 12 mm- %100 3 mm,

%30 12 mm- %70 3 mm, %50 12 mm- %50 3 mm, %70 12 mm- %30 3 mm, %100 12 mm- %0 3 mm oranlarında donatı uzunlukları kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı fiber donatı kombinasyonları ile hazırlanan numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri Şekil 21(a)'da verilmiştir. 7 gün kürlenmiş numunelere ait deney sonucunda maksimum dayanımı 8500 kN/m<sup>2</sup> dayanım ile %50 12 mm- %50 3 mm içerikli numune vermiştir. 28 günlük numunelere ait deney sonucunda ise maksimum dayanımları %50 12mm-%50 3mm ve %100 12 mm- %0 3 mm içerikli numuneler vermiştir. Şekil 21(a)'dan 7 gün ve 28 gün kürlenmiş numuneler içerisinde %50 12 mm-%50 3 mm oranındaki numunelere kadar, donatı kombinasyonu içerisinde 12 mm uzunluğundaki donatı oranının artması ile serbest basınç dayanımı üzerinde ciddi artışın olduğu gözlenmiştir. Bu değerden sonra donatı kombinasyonu içerisinde artan 12 mm uzunluğundaki donatı miktarının serbest basınç dayanımı üzerinde dikkate değer bir artışa neden olmadığı görülmüştür.

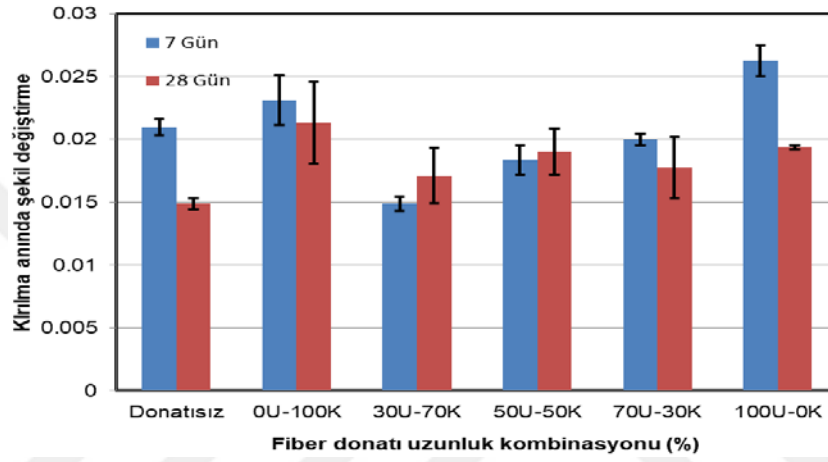
Şekil 21(b)'de farklı donatı kombinasyonlarının kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi sunulmuştur. Buna göre hibrit donatı uzunlukları %100 3 mm yada %100 12 mm uzunluğundaki donatılara göre kırılma anında daha düşük şekil değiştirme değerleri vermiştir. Kombinasyon içerisindeki 12 mm uzunluğundaki donatı miktarının artması ile kırılma anındaki şekil değiştirme değerlerinin yükseldiği görülmektedir.

Uzunlukça hibrit fiber katkının numunelerin sünekliği üzerindeki etkisi Şekil 21(c)'de görülmektedir. Şekilde donatı ilavesi ile numunenin sünekliğinin ve maksimum serbest basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, 3 mm uzunluğundaki donatı katkısının süneklikleten ziyade serbest basınç dayanımını arttırdığı, 12 mm uzunluğundaki donatı katkısının ise dayanıma olan katkısının 3 mm uzunluğundaki donatıya göre bir miktar azaldığı ancak numunenin ciddi bir süneklik özelliği kazandığı görülmektedir. Hibrit donatılı numuneye ait gerilme şekil değiştirme davranışı incelendiğinde, 3 mm uzunluğundaki numuneye göre sünekliğin daha yüksek olduğu, serbest basınç dayanımının ise 3 mm ve 12 mm uzunluklu numunelere nazaran artış gösterdiği belirlenmiştir.

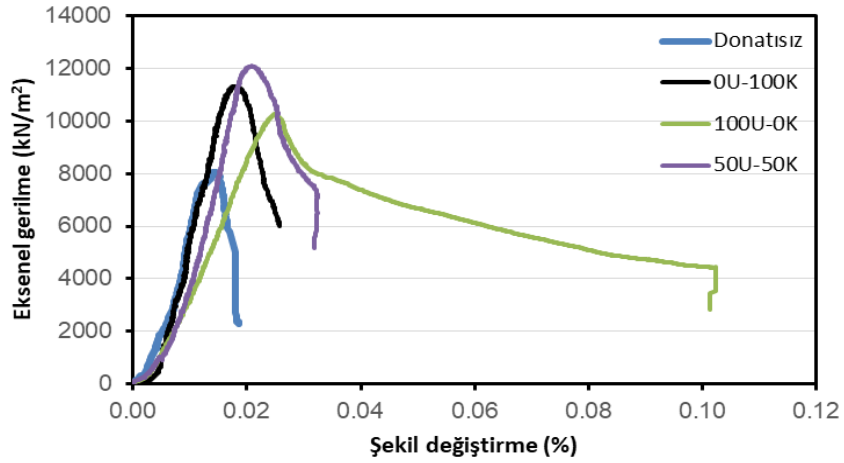
Donatı kombinasyonlarındaki değişimin 7 ve 28 günlük numunelerin elastisite modülü (sekant modülü) değerleri üzerindeki etkisi Şekil 21(d)'de verilmiştir. Deney sonucunda 7 günlük numuneler arasında maksimum elastisite modülü değeri %70 12 mm- %30 3 mm içeriğine sahip numune verdiği tespit edilmiştir. 28 günlük maksimum elastisite modülü değeri %30 12 mm- %70 3 mm içeriğine sahip numune verdiği tespit edilmiştir.



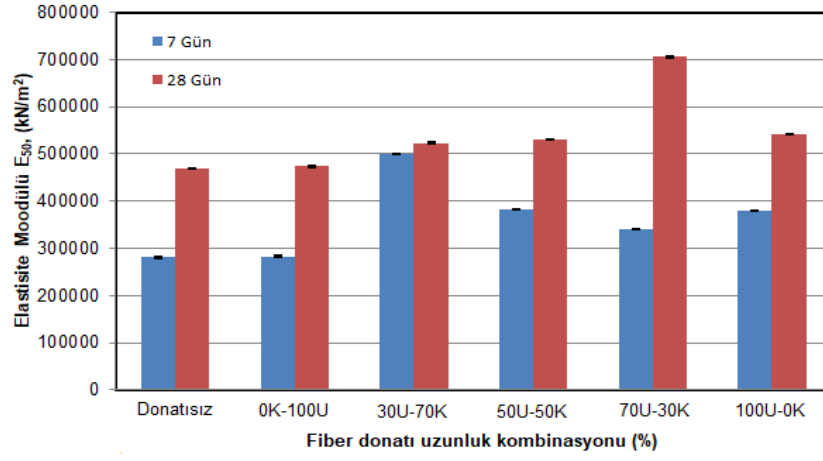
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 21. Uzunlukça hibrit lif katkısının (a) Serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi, (b) Kırılma anındaki şekil değiştirme üzerindeki etkisi, (c) Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki etkisi, (d) Sekant modülü üzerindeki etkisi.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek plastisiteli siltli zemin, C sınıfı uçucu kül ve alkali aktivatör kullanılarak bağlayıcılık kazanması ve polipropilen fiber kullanılması ile stabilize edilmiştir. Merkezi Kompozit Deney Tasarımı ile belirlenen deney tasarımı dikkate alınarak regresyon analizleri gerçekleştirilmiş, analiz sonucuna göre zemin stabilizasyonunda kullanılacak optimum uçucu kül ve alkali aktivatör içeriği değerleri belirlenmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen model dikkate alınarak, Çeşitli aktivatör ve uçucu kül içeriklerindeki değişimin Si/Al, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları ve serbest basınç dayanımı üzerindeki değişimleri belirlenmiştir. Optimize edilen içerikler dikkate alınarak, alkali aktifleştirilmiş uçucu kül ile stabilize edilen zemin örneklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geopolimer katkı ile iyileştirilen zemine 3 mm, 12 mm, uzunlukça hibrit fiber lif katkısının malzemenin serbest basınç dayanımı, kırılma anında şekil değiştirme yüzdesi, gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda aşağıda verilen sonuçla elde edilmiştir:

- ✓ Yapılan istatistiksel analiz neticesinde belirlen optimum uçucu kül içeriği ve alkali aktivatör içeriklerinde hazırlanan numuneler üzerinde yapılan XRD ve FTIR analizleri sonucunda stabilize edilen zemin içerisinde geopolimer esaslı bileşiklerin varlığı savı desteklenmiştir.
- ✓ NaOH/NaSi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı serbest basınç dayanımı ve süneklik parametreleri üzerinde etkilidir.
- ✓ Zeminin geopolimerler ile stabilizasyonunda Si/Al, Si/Ca ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları önemli parametredir. Fakat bu oranlar, stabilize edilmiş zeminlerin serbest basınç dayanımının değerlendirilmesinde yeterli değildir. Aktivatör içeriği, Si/Al, Si/Ca ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranları kadar göz önünde bulundurulması gereken diğer bir parametredir. Stabilize edilmiş zeminlerin serbest basınç dayanımında, sıkıştırma önemli rol oynamaktadır. Geopolimer esaslı zemin iyileştirme yöntemlerinde alkali aktivatörün, hem bağlayıcıyı aktive etmek hem de uygun kompaksiyon için yerli nem sağlamak görevleri vardır. Aktivatör içeriği sıkıştırmayı etkileyen belirleyici etkenlerden biridir. Düşük aktivatör içeriği, yetersiz sıkıştırmadan dolayı boşlukların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda, Si/Al, Si/Ca ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O gibi oranlar ideal aralıkta olsalar bile düşük serbest basınç değeri elde edilmektedir.

- ✓ İstatistiksel analizler değerlendirilmesi sonucunda, uçucu kül içeriğine göre alkali aktivatör içeriğinin serbest basınç dayanımı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- ✓ 3 mm ve 12 mm uzunluğundaki fiber donatıları her biri, stabilize edilmiş zeminin fiziksel özellikleri üzerinde karakteristik katkıya sahiptir. 3 mm uzunluğundaki fiber donatılarla stabilize edilmiş zemin numunelerinin serbest basınç değerleri 12 mm uzunluğu kullanılarak elde edilen numunelerin serbest basınç değerlerinden yüksektir.
- ✓ Hibrit uzunluktaki lifler kullanılması suretiyle hem 3 mm uzunluktaki, hem de 12 mm uzunluktaki fiber donatıların karakteristik özelliklerinden yararlanılabilmektedir. Stabilizasyonda hibrit uzunluktaki fiber donatıların kullanılması ile serbest basınç dayanımı değeri azalmadan yüksek sekant modülü ve süneklik sağlanmaktadır.
- ✓ Stabilizasyonu yapılan zeminlerin serbest basınç dayanımı, uzunlukça hibrit donatılar içerisindeki 12 mm uzunluğundaki donatı içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Uzunlukça hibrit fiber donatılar 3 mm uzunluğa sahip fiber donatılardan daha iyi süneklik performansı gösterirken, 12 mm uzunluğundaki fiber donatılar kullanılarak stabilize edilen zemin numunelerinin serbest basınç dayanımından daha yüksek performans göstermiştir.
- ✓ Geopolimer katkılı donatısız, 3mm uzunluğunda ve 12 mm uzunluğunda donatı ile iyileştirilen numunelerin mikro boyutlu görüntülerinden zemin ortamında alkali aktifleşmiş ve topaklanmış ortamların varlığı görülmüştür. Söz konusu heterojen yapı içerisindeki siltli malzemenin topaklaştığı bölgeler içerisinde meydana gelen çatlaklar malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Bunun yanında bu topaklar nedeni ile fiber donatılar zemin ile heterojen biçimde karışmamaktadır. Fiber katkıların topaklaşan kısımlarda zemin ile etkileşime girememektedir.

İleriye dönük çalışmalara rehber olması amacıyla verilebilecek öneriler şunlardır:

- ✓ Çalışma, uzunlukça hibrit donatı katkısının, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dinamik yükleme gibi etkilere maruz kalan stabilize edilmiş zemin üzerindeki etkilerinin incelenmesi sureti ile geliştirilebilir.

## KAYNAKÇA

- Akyıldırım, S. (2021). *Uçucu Kül Bazlı Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürü Etkisinin ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkileri*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.692948)
- Akyüncü, V. (2012). *F ve C Tipi Uçucu Küllerin Çimento ile İkame Edilmesiyle Üretilen Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Karşılaştırılarak İncelenmesi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.304751)
- Akyüz, İ. (2009). *Donatılı ve Donatısız Zemin Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması*. Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.237404)
- Alkaya, D. (2009). Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 61-72.
- Altındal, İ. (2020). *Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (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*. Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (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*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.467802)
- Avlayan, B. (2022). *Polipropilen Lif Donatılı Geopolimer Derin Karıştırma Kolonunun Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu ve Sıcaklık Etkisinin Araştırılması*. Bayburt: Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.765600)
- Ayan, E. (2009). *Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.251281)
- Ayan, E. (2021). *Kilin Kireç ve Çimento ile Stabilizasyon Karşılaştırmaları*. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.702319)
- Aydoğdu, A. (2019). *Mikro ve Makro Sentetik Fiber Donatılı Kangal Termik Santrali Uçucu Kül İkamelili Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.584274)
- Bakırdöven, A. (2021). *Endüstriyel Atıkların Geopolimerler Eldesinde Kullanılabilirliği ve Karakterizasyonu*. Malatya: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.666469)
- Balatan, F. (2019). *Kurşun- Çinko Maden Atığının Zemin Stabilizasyonunda Değerlendirilmesi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.661770)

- Balçıkanlı, M. (2016). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimentosuz Cürüflü Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özellikleri ve Üretim Optimizasyonu*. Hatay: İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.444938)
- Balta, İ. (1984). *Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu*. Trabzon : Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.378757)
- Balun, B. (2019). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Hibrit Bağlayıcıların Üretilirliğinin İncelenmesi*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.539013)
- Bekar, F. (2020). *Farklı Kür Koşullarının Alkali Aktivite Edilmiş Betonların Mühendislik Özelliklerine Etkisi*. Düzce: Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.654933)
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.629835)
- Binod Singhi, A. I. (2016). *Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending*. Arabian Journal for Science and Engineering.
- Bozkurt, E. (2020). *Arazide Yüksek Su Muhtevası İçeren Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu*. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.629836)
- Çakılciöğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu*. Sakarya : Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.216270)
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı* . Trabzon : Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.300926)
- Çelik, Z. H. (2020). *Zemin Stabilizasyonunda Pomza Taşının İncelik Etkisinin İncelenmesi*. Bayburt : Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (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*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.295471)
- Dağlı, E. (2021). *Uçucu Kül Stabilizasyonunun Killi Zeminlerin Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkisi*. Zonguldak : Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.673127)
- Doğan, S. (2022). *Aktivatör Olarak NaOH ile Aktive Edilmiş Farklı Tipte Uçucu Küllerin Organik Zeminlerin Stabilizasyonunda Etkilerinin İncelenmesi*. Niğde: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.741214)
- Erich D. Rodríguez, S. A. (2013). *Effect of Nanosilica-Based Activators on the Performance of an Alkali-Activated Fly Ash Binder*. Cement and Concrete Composites.

- Filazi, A. (2020). *Tane Boyutu Optimize Edilmiş En Yüksek Dolgu Faktörüne Göre F ve C Sınıfı Uçucu Küllerin Çimento Harçlarına Etkisi*. Kırıkkale: Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.629693)
- Gençoğlu, E. (2022). *Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Dane Boyutunun CBR ve Dayanıma Etkisi*. Bayburt: Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.714259)
- H.A. Abdel-Gawwad, S. A.-E.-E. (2016). *A Novel Method to Produce Dry Geopolymer Cement Powder*. Egypt: HBRC Journal.
- Karaaslan, C. (2021). *Su Yapılarında Kullanılabilir Pomza Esaslı Geopolimer Betonların Geliştirilmesi*. Diyarbakır: Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.682099)
- Keskinkılınç, M. K. (2019). *Alkali Aktive Edilmiş Harç Üretiminde Krom Cürufu ve Atık Mermer Tozunun Değerlendirilmesi*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.572627)
- Kılıç, G. (2008). *Çimento ile Zemin Stabilizasyonu*. İstanbul : Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.213300)
- Kocabey, S. (2019). *Düşük Plastisiteli Killerin Kireçle Stabilizasyonunda İnceliğin Etkisi*. Bayburt : Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.533972)
- Kurucu, K. (2022). *Geopolimer Bağlayıcı ve Mikro Fiber Donatı ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Silt Zeminin Mekanik Özellikleri*. Bayburt: Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.755184)
- Küçük, F. (2021). *Yüksek Performanslı Polipropilen Fiber Katkısının Kil Zeminin Drenajsız Kayma Direncine Etkisinin İncelenmesi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.674761)
- Küçükali, Ö. (2011). *Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi*. Ankara : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.299630)
- Mancı, A. (2019). *Bor Atığı Kullanımının Pomza Agregalı Hafif Betonların Mühendislik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.562664)
- Masike, N. (2019). *Silis Dumanı İlaveli Derin Karıştırma Kolonlarının Üç Eksenli Basınç Dayanımı ve Konsolidasyon Özelliklerinin Araştırılması*. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.576789)
- Muhamad Amir, W. m. (2008). *An Application Of Box-Cox Transformation To Biostatistics Experiment Data*. Malezya: Malezya Terengganu Üniversitesi Fen-Teknoloji Fakültesi Matematik Bölümü.

- Oral, T. (2020). *Makro Sentetik Fiber Donatıları Kullanım Avantajlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Kriteri Dahil Edilerek Topsıs ve AHP Yöntemiyle Belirlenmesi*. İstanbul: Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.659912)
- Öksüz, K. (2006). *Afşin- Elbistan Termik Santralı Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*. Adana : Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.183731)
- Önen, B. (2021). *Taban Zemini Taşıma Gücü Sorunlu Yol Kesimlerinde Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Derin Karıştırma Yöntemi İçin Sinanoğlu- Limandere Şehir Geçiş Örneği*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.683210)
- Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirilmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.287312)
- Özbey, N. (2021). *Farklı Bağlayıcı Miktarına Sahip Yüksek Fırın Cürufu ikameli Uçucu Küllü Geopolimer Betonların Durabilitesi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.692636)
- Peter Duxson, J. L. (2008). *Designing Precursors for Geopolymer Cements*. Journal Of The American Ceramic Society.
- Study on the role of n-SiO<sub>2</sub> incorporation in thermo-mechanical and microstructural properties of ambient cured FA-GGBS geopolymer matrix*. (2018).
- Şahbaz, İ. (2020). *Çimento ve Polipropilen Lif Kullanarak Killi Zeminlerin İyileştirilmesi*. Bursa : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.683073)
- Şahin, D. D. (2019). *Uçucu Küllerde İnceliğin Puzolanik Aktiviteye Etkisi*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.548440)
- Şengül, E. (2010). *Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi*. Trabzon : Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.270694)
- Şıklar, E. (2000). *Regresyon Analizine Giriş*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- Şinik, O. (2019). *Geopolimer betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*. Afyonkarahisar: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.566841)
- T. Revathi, R. J. (2018). *Study on the Role of n-SiO<sub>2</sub> Incorporation in Thermo-Mechanical and Microstructural Properties of Ambient Cured FA-GGBS Geopolymer Matrix* (Cilt 449). Chennai.
- Tandoğan, M. (2021). *Diatomitin Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Trabzon : Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.686501)
- Taşdemir, R. (2020). *Çapraz Bağlı Polikarboksilat Esaslı Adsorbentle Kurşun (II) Adsorpsiyonunun Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu*. Isparta: Süleyman Demirel

- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.608088)
- Topal, Ö. (2020). *Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Yangın Dayanımına Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisinin Araştırılması*. Malatya: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.624703)
- Topçu, H. M. (2022). *Yüksek Plastisiteli Kilin Uçucu Kül ve Nano-SiO<sub>2</sub> ile Stabilizasyonu*. Niğde: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.717899)
- Tuğlu, H. (2022). *Tuğla Atıklarının Düşük Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliği*. Bayburt : Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.714275)
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti*. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.183645)
- Tuyan, M. (2017). *Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç ve Beton Geliştirilmesi*. İzmir: Ege Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.479544)
- Tülek, M. (2007). *Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğin Araştırılması*. Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.177873)
- Türkyılmaz, H. (2011). *Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Prosesi ile Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.295192)
- Yakupoğlu, A. (2010). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufu Harçların Özellikleri*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.282998)
- Yegin, Y. (2020). *Isparta Gölcük Yöresi Volkanik Külünden Üretilen Geopolimer Betonun Özelliklerinin Fabrika Atıkları ve Nano Malzemeler ile İyileştirilmesi*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.655113)
- Yıldız, Ü. (2020). *Ekonometrinin Temelleri (1 b.)*. (T. M. Sinan, Dü.) Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin tandart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.397321)
- Yılmaz, V. (2021). *Yüksek Fırın Cürufu ve Nano SiO<sub>2</sub> ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Zeminin Bir Boyutlu Oturma Davranışının Araştırılması*. Niğde: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.668473)

## ÖZ GEÇMİŞ

Dilek AKBAŞ, .... yılında .....’da doğdu. İlköğrenimini ve ortaokulu İMKB İnönü Okulu’nda, lise öğrenimini ise Nenehatun Anadolu Lisesin’ de tamamladı, 2016 yılında başladığı lisans öğrenimi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2020 yılında tamamlayan Dilek AKBAŞ, 2020 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Geoteknik Ana Bilim Dalı’nda lisansüstü öğrenimine başladı.

