



# Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Kilin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi

Nagihan Doğan<sup>1</sup> , Müge Elif FIRAT<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Firat University, Technology Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 22/11/2023  
Düzeltilme: 10/07/2024  
Kabul: 21/10/2024

## Anahtar Kelimeler

Zemin stabilizasyonu  
Uçucu kül  
Silis dumanı  
Cam elyaf  
UCS

## Article Info

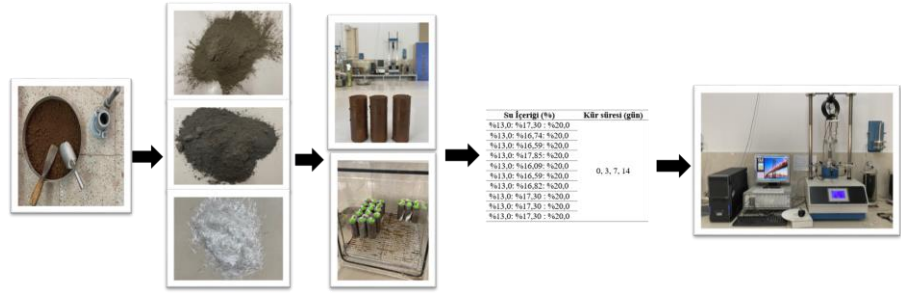
Research article  
Received: 22/11/2023  
Revision: 10/07/2024  
Accepted: 21/10/2024

## Keywords

Soil stabilization  
Fly ash  
Silica fume  
Fiberglass  
UCS

## Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf katkılarının killi bir zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri farklı deneysel koşullarda incelenmiştir. / In this study, the effects of fly ash, silica fume and glass fibre additives on the engineering properties of a clayey soil were investigated under different experimental conditions.



**Şekil A:** Killi zeminin uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf katkısının UCS davranışı üzerindeki etkisi/**Figure A:** Effect of fly ash, silica fume and glass fiber addition on the UCS behavior of clay soil

## Highlights (Önemli noktalar)

- Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, killi zeminin plastik davranışını iyileştirmiştir. / Silica fume and fly ash additives improved the plastic behavior of the clay soil.
- Farklı su içeriklerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testlerinde, su içeriği arttıkça UCS değerlerinin düştüğü; ancak düşük su içeriğinde ve katkı eklenmiş numunelerde UCS değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. / Unconfined compression strength (UCS) tests at different water contents showed that UCS values decreased as the water content increased; however, UCS values increased at low water content and in samples with admixtures.
- %20 silis dumanı katkısı, UCS değerlerinde en etkili artışı sağlamış ve zeminin dayanım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. / The 20% silica fume admixture provided the most effective increase in UCS values and significantly improved the strength properties of the soil.

**Aim (Amaç):** Bu çalışmanın amacı, stabilizasyon malzemelerinin (silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf) killi zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve bu katkı maddelerinin zeminin dayanım, plastisite ve kırılma özelliklerini nasıl değiştirdiğini belirlemektir. / The aim of this study was to investigate the effects of stabilization materials (silica fume, fly ash and glass fiber) on the engineering properties of clayey soils and to determine how these additives change the strength, plasticity and brittleness properties of the soil.

**Originality (Özgünlük):** Farklı katkı malzemesinin farklı koşullarda bir arada kullanılarak zeminin dayanım, plastisite ve kırılma özellikleri üzerindeki bütüncül etkilerini ortaya koymasındır. / It is to reveal the holistic effects of different additives on the strength, plasticity and brittleness properties of the soil by using them together under different conditions.

**Results (Bulgular):** Çalışmada, katkı maddelerinin killi zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği ve özellikle %20 silis dumanının dayanımı artırdığı, düşük su içeriğinde daha yüksek dayanım sağladığı belirlenmiştir. / In the study, it was determined that the additives improved the engineering properties of the clay soil and especially 20% silica fume increased the strength and provided higher strength at low water content.

**Conclusion (Sonuç):** Çalışma sonuçları kil zeminin fiziksel ve mekanik performansını arttırmak için belirli oranlarda mineral katkı ve lif eklemelerinin başarılı bir stabilizasyon yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. / The results of the study show that the addition of mineral additives and fibers at certain ratios can be used as a successful stabilization method to improve the physical and mechanical performance of clay soils.



# Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Kilin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi

Nagihan DOĞAN<sup>1</sup> , Müge Elif FIRAT<sup>1\*</sup> <sup>1</sup>Firat University, Technology Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 22/11/2023  
Düzeltilme: 10/07/2024  
Kabul: 21/10/2024

## Anahtar Kelimeler

Zemin stabilizasyonu  
Uçucu kül  
Silis dumanı  
Cam elyaf  
UCS

## Özet

Bu çalışmada farklı stabilizasyon malzemelerinin killi bir zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla killi zemine %5, %10, %20 oranlarında uçucu kül ile silis dumanı, %1, %1,5, %2 oranlarında cam elyaf eklenmiştir. Katkı maddeleri ile stabilize edilen zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için Atterberg limitleri ve Proktor deneyi uygulanmıştır. Dayanım özelliklerini değerlendirebilmek için stabilize edilmiş killi zemine farklı kür sürelerinde ve farklı su içeriklerinde tek eksenli basınç testi uygulanmıştır. Deneylerin sonucunda, silis dumanı ve uçucu kül katkılarının kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Silis dumanının %20 oranında ilave edilmesiyle plastisite indeksi %2,080 azalırken, %20 uçucu kül ilave edilmesiyle %0,042 azalmıştır. Serbest basınç dayanım (UCS) değerleri incelendiğinde, su içeriğinin artmasıyla birlikte killi zeminin UCS değeri azalmıştır. Optimum su içeriğinden düşük su içeriğine sahip killi zemin daha büyük UCS değerine sahipken, mineral katkı ve lif ilave edilmesiyle UCS değeri artmıştır. Silis dumanının UCS değerleri üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Su içeriği arttıkça killi zeminin UCS yenilme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf ilave edilen kil numunelerinin kırılma indeksi değerlerinin, optimum su içeriğinde doğal kil numunelerine göre daha kırılma hale geldiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kil zeminine ilave edilen mineral katkı malzemelerinin ve liflerin zeminin fiziksel ve mühendislik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

## Evaluation of the engineering performance of clay improved using fly ash, silica fume and glass fiber

## Article Info

Research article  
Received: 22/11/2023  
Revision: 10/07/2024  
Accepted: 21/10/2024

## Keywords

Soil stabilization  
Fly ash  
Silica fume  
Glass fiber  
UCS

## Abstract

In this study, the effects of different stabilization materials on the engineering properties of a clay soil were investigated. To achieve this objective, silica fume and fly ash were added to the clayey soil in the proportions of 5%, 10% and 20%, and the mixture of glass fibers was obtained in the proportions of 1%, 1.5% and 2%. The physical properties of the soil with additives were studied by Atterberg limits and Proctor tests. The UCS tests were performed on the treated clay soil, considering different curing times, and different water contents to evaluate its strength properties. The experimental results showed that the inclusion of silica fume and fly ash resulted in a reduction of the plasticity index and liquid limits of the clay soil. Especially, the plasticity index decreased by 2.080% with the addition of 20% silica fume, and 20% fly ash resulting in a decrease of 0.042%. Analysis of the UCS values revealed a decrease in the strength of the clayey soil with increasing water content. The clayey soil exhibited higher UCS strength below the optimum water level, and the introduction of mineral additives and fibers further enhanced this strength. Silica fume had a more pronounced effect on UCS values. An increase in water content caused a decrease in the UCS of the clayey soil. The brittle index values of clay samples containing silica fume, fly ash, and glass fibers indicated that brittleness was increased comparing to natural clay sample at the optimum water content. These results emphasize the positive influence of added mineral additives and fibers on the physical and engineering properties of clay soils.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kil zeminler, altyapı sistemleri için sıkça kullanılan bir zemin türüdür, ancak bu tür zeminlerin stabilize edilmesi çok önemlidir. Stabilizasyon işlemi, kil

zeminlerin mukavemetini artırmak, su emilimini azaltmak ve zeminin dayanıklılığını artırmak amacıyla gerçekleştirilir. Mühendislik uygulamaları sırasında, altyapı projelerinde kullanılan kil sınıfı zeminler, çevresel etmenlerden kaynaklanan su

içeriği değişiklikleri ve yüklerin etkisi altında değişkenlik gösterir. Bu değişen su içeriği, yüksek hacim değiştirme yeteneğine sahip kil sınıfı zeminlerin kıvam sınırlarında değişikliklere yol açabilir. Farklı plastisite özelliklerine sahip kil türlerinin, yapısal özellikler ve dayanıklılık üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, zeminin dengesizleşmesine ve yer altı yapının zarar görmesine yol açabilir. Stabilizasyon işlemi, su emilimini azaltarak bu tür sorunların önlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, kil zeminlerin mukavemeti genellikle düşüktür. Bu, üzerine inşa edilen altyapının uzun vadeli stabilitesini tehdit edebilir. Stabilizasyon, kil zeminlerin taşıma kapasitesini artırarak bu zeminlerin daha güvenli bir temel sağlamasına yardımcı olur. Son olarak, kil zeminlerin değişken yapısı nedeniyle, iklim koşulları ve mevsimsel değişiklikler zeminin özelliklerini etkileyebilir. Bu değişkenlik, altyapı projelerinin uzun vadeli dayanıklılığını tehlikeye atabilir. Stabilizasyon, zeminin mevsimsel değişikliklere karşı daha az duyarlı hale getirir. Sonuç olarak, kil zeminlerin altyapı sistemleri için stabilize edilmesi, projenin dayanıklılığını artırır, su hasarlarını önler ve ekonomik kazanım sağlar. Bu nedenle, kil zeminlerin stabilize edilmesi, altyapı projelerinin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde tamamlanmasını sağlamak için kritik bir adımdır [1-4]. Stabilizasyon teknikleri, zemin dayanıklılığında, termal denge, hidrolik özellikler ve diğer mühendislik özelliklerdeki iyileşmeyi içermektedir. Zeminlerin stabilizasyonu üç kategoride incelenebilir: biyolojik, fiziksel ve kimyasal. Biyolojik stabilizasyon, bitki kökleri tarafından yapılan bitki güçlendirme veya mikroorganizmaların biyosementasyonu ile gerçekleştirilir. Farklı mimari, morfolojik, fizyolojik ve biyotik özelliklere sahip bitki kökleri, toprakların fiziksel ve kimyasal evrimini etkileyerek yapısal kararlılık sağlar [5-7]. Mikroorganizmalar tarafından üretilen bağlayıcı maddeleri kullanan mikrobiyal olarak indüklenmiş kalsit çöktürme gibi biyosementasyon yöntemleri, zeminlerin kararlılığını artırmak için kullanılır. Fiziksel iyileştirme, zemin porozitesini ve tanecikler arası sürtünme veya kilitlemeyi değiştirerek, zemin fraksiyonlarını veya sıkılaşmayı değiştirme yoluyla, mukavemet ve kararlılık gibi fiziksel özelliklerini iyileştirme sürecidir [8-10]. Kimyasal stabilizasyonda ise, kil zeminlere kimyasal katkı maddeleri eklenir. En yaygın olarak kullanılan kimyasallar, kireç, çimento veya kimyasal polimerlerdir. Bu katkı maddeleri, kilin kohezyonunu artırır, zeminin sertleşmesini sağlar ve dayanıklılığını artırır. Bu tür kimyasalların yüksek etki alanı nedeniyle, son yıllarda biyopolimerik ve polimerik stabilizatörler gibi

temiz ve düşük maliyetli kimyasallar değerlendirilmiş ve önerilmiştir [11-15].

Kil zeminler tipik olarak bir yüke veya baskıya maruz kaldığında çeşitli şekillerde deformasyona uğrarlar. Tek eksenli basınç dayanımı, kil zeminin dikey bir yüke karşı direncini ifade eder ve zeminin sıkıştırma özelliklerini belirler. Bu değer, kil zeminin mukavemetini ve taşıma kapasitesini belirlemeye yardımcı olur. Bu dayanım değeri, mühendislik yapılarının temel tasarımında zeminin taşıma kapasitesinin ve stabilitesinin değerlendirilmesinde, zemin iyileştirme projelerinde kil zeminin davranışını anlamak ve uygun önlemleri alarak güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmeye yardımcı olmada önemlidir. Kil zeminlerdeki tek eksenli basınç dayanımı, zeminin fiziksel özelliklerine, mineralojisine, nem içeriğine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, herhangi bir projede doğru dayanım değerlerinin belirlenmesi önemlidir [16-19].

Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf kullanılarak killi zeminlerin mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Totiç vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada killi zemine %5-%25 oranları arasında uçucu kül ilave ederek hazırladıkları zemin numunelerinin mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Optimum su içeriğinde ve 1, 8, 16, 32 gün kür sürelerinde hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Uçucu kül içeriğinin artışıyla birlikte zemin numunelerinin mekanik özelliklerinde iyileşmenin olduğu gözlenmiştir [20]. Türköz vd. (2018) çalışmalarında killi zemin üzerinde kireç ve silis dumanının etkilerini incelemişlerdir. %3 kireç ile %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20 oranlarında silis dumanı killi zemine eklenmiştir ve %10 silis dumanı ilavesiyle hazırlanan numunenin optimum stabilizasyonu sağladığı belirlenmiştir [21]. Rajabi vd. (2023) killi zemine %0,2, %0,5, %1, %1,5 polipropilen ve cam elyaf ekleyerek zemin üzerindeki etkisini incelemişlerdir [22].

Son yıllarda literatürde killerin tek eksenli basınç dayanımını artırmak için kimyasal ve mineral katkı malzemeleri ile liflerin kullanıldığı birçok çalışma yapılmış ve aşağıdaki gibi gruplar halinde sınıflandırılmıştır.

**Çimento Katkılı Kil Zeminler:** Çimento, kil zeminlerin dayanımını artırmak için sıkça kullanılan bir mineral katkı malzemesidir. Kil-çimentoyu bir araya getirilerek, zeminin dayanımını artırılır ve yapısal kararlılık sağlanır. Bu, altyapı projelerinde ve yolların güçlendirilmesinde yaygın

bir uygulamadır. Moreira vd. (2019) yaptıkları çalışmalarında, porozitenin, kuru birim hacim ağırlığının, çimento içeriğinin ve porozite/hacimsel çimento içeriği oranının siltli zemin-çatı kiremit atığı (ÇKA) karışımlarının tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, çimento artışıyla, ÇKA-zemin karışımlarının dayanımının doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir. Öte yandan, sabit bir çimento yüzdesinde ÇKA eklenmesi, örneklerin UCS'sini azaltırken, porozitenin azalması UCS'yi arttırmaktadır [23].

**Uçucu kül Katkılı Kil Zeminler:** Kalsiyum karbonat gibi mineral katkıları, kil zeminlerin dayanımını artırmak için kullanılır. Bu katkıları, kil mineralleriyle reaksiyona girerek zeminin sertleşmesini teşvik eder. Bilici vd. (2020) kil zeminin dayanımı üzerinde farklı oranlarda ve farklı kür sürelerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu malzemelerinin etkilerini incelemişlerdir. Maksimum dayanım %3 kireç + %12 uçucu kül ve %3 kireç + %9 yüksek fırın cürufu ilavesinde belirlenmiştir. Kür öncesinde atık malzemeler ile stabilizasyonda tek eksenli basınç dayanımlarının eşit olduğu gözlenirken, kür süresinin artışı ile uçucu külün yüksek fırın cürufuna nazaran daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir [24]. Çimen ve Keleş (2020) çalışmalarında, yüksek plastisiteli kile farklı oranlarında uçucu kül ilave ederek fiziksel özellik ve serbest basınç dayanımı deneylerini yürütmüşlerdir. Ardından, bu deney serilerine sabit oranda kireç ilavesiyle aynı deneyleri tekrarlamışlardır. Deneysel çalışmalar, kullanılan uçucu külün yüksek plastisiteli kilin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir [25].

**Polimer Lifler:** Polimer lifler, kil zeminlerin dayanımını artırmak ve çatlak oluşumunu azaltmak için kullanılan lif malzemeleridir. Bu lifler, zemin matrisini güçlendirir ve iyileştirir. Şahbaz ve Ünsever (2020) çalışmalarında, zemini iyileştirmek için farklı oranlarda ve farklı kürlenme sürelerinde çimento ve polipropilen lif kullanarak katkı ve katkısız numunelerin serbest basınç dayanımı, CBR ve şişme deneylerini kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, katkı maddelerinin katkısız zeminin mühendislik özellikleri üzerinde büyük oranda iyileşme sağladığı görülmüştür [26].

**Cam Elyaf Katkılı Kil Zeminler:** Cam elyaf, kil zeminlerin mekanik özelliklerini artırmak için kullanılan bir lif malzemesidir. Bu katkı, kil zeminlerin dayanıklılığını artırabilir [27-29].

**Kil ve Silika Katkılı Karışımlar:** Kil ve silika gibi mineral katkıları, kil zeminlerin tek eksenli basınç

dayanımını geliştirmek için kullanılmıştır. Bu tür karışımlar, zeminin mukavemetini artırabilir [30-32].

Altyapı malzemesi olarak kullanılacak killerin stabilizasyonu, geoteknik mühendisliğinde önemli bir konudur ve zeminin mekanik özelliklerini geliştirerek mühendislik projelerinin dayanıklılığını artırabilir. Bu bağlamda, stabilizasyonda mineral katkı malzemelerinden uçucu kül ve silis dumanı ile lif kullanımının kilin fiziksel ve mühendislik özelliklerine etkisinin farklı çevre koşullarında araştırılması büyük önem taşımaktadır.

Uçucu kül, genellikle termal enerji santrallerinde kömür yakılması sırasında oluşan yan ürünlerden elde edilir. Bu malzeme, kalsiyum oksit (CaO), silis (SiO<sub>2</sub>), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi bileşenleri içerir. Zemin stabilizasyonunda uçucu kül, toprakla karıştırılarak kullanılır. Kalsiyum oksit içeriği nedeniyle, uçucu kül, toprakla reaksiyona girerek zeminin sıkıştırılabilirliğini artırır. Uçucu kül, zeminde suyun tutulmasını iyileştirir ve böylece donma-çözülme etkilerine karşı direnç sağlar. Ayrıca, toprakla karıştırıldığında zeminin taşıma kapasitesini artırabilir ve yolu veya yapının temelini güçlendirebilir. Öte yandan silis dumanı, silika (silis) mineralinin öğütülmesi veya özel işlemler sırasında elde edilir. Kimyasal olarak, silis dumanı yüksek oranda silika (SiO<sub>2</sub>) içerir. Zemin stabilizasyonunda silis dumanı, toprakla karıştırılarak kullanılır ve bu, zeminin kohezyonunu (yapışkanlığını) artırır. Bu da zeminin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini iyileştirir. Silis dumanı, zeminin su geçirmezliğini artırabilir ve erozyona karşı koruma sağlayabilir.

Çalışma kapsamında, kil zeminlerin stabilizasyonu için uçucu kül, silis dumanı ve cam fiberin farklı kombinasyonları kullanılarak, zeminlerin fiziksel özellikleri ve tek eksenli basınç dayanımlarını incelenmiştir. Bu çalışma, zemin stabilizasyonu alanında yeni ve kapsamlı bir araştırma sunmaktadır, farklı su içerikleri, kürlenme süreleri ve katkı oranları altında her malzemenin doğal zemin üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Öte yandan çalışma ile farklı su içerikleri ve kürlenme sürelerinin zeminlerin dayanıklılığına etkisini araştırarak, bu iki önemli parametrenin zemin stabilizasyonu sürecine olan etkisinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı, birçok inşaat projesi ve temel tasarımı için kritik bir parametredir. Bu çalışma, farklı katkı malzemelerinin zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisini ölçerek, mühendislik uygulamaları için önemli veriler

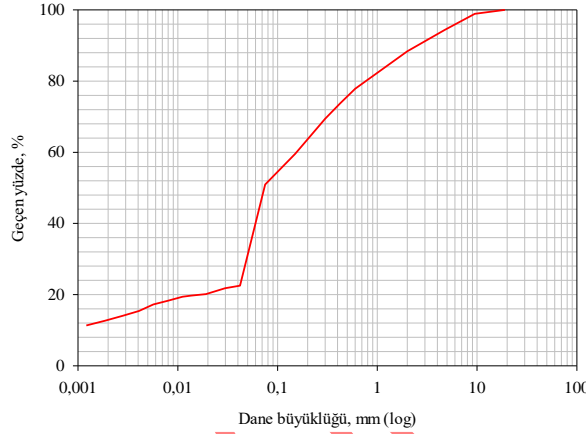
sunmaktadır. Çalışma sonuçları, zemin stabilizasyonu projeleri için tasarım ve uygulama rehberleri oluşturmak amacıyla kullanılabilir. İnşaat mühendisleri ve araştırmacılar için pratik ipuçları sağlayarak, bu alandaki çalışmalara katkıda bulunmayı hedeflenmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

### 2.1. Materyal (Material)

Zemin (Soil)

Bu çalışmada kullanılan zemin örnekleri, Elazığ ilinin Ataşehir Mahallesi'nde yer alan bir binanın temel kazısı sırasında çıkarılan topraklardan elde edilmiştir. Bu örnekler, kazı işlemleri sırasında özenle toplanmış ve analiz için uygun şekilde muhafaza edilmiştir. Bu zeminin likit limit değeri %49,45, plastisite indeksi %24,04, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,720 gr/cm<sup>3</sup> ve optimum su muhtevası %17,3 olarak test edilmiştir. Ayrıca, özgül ağırlığı 1,66 gr/cm<sup>3</sup> olan bu zemin numunesi, birleştirilmiş sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli kil (CL) sınıfına dahil edilmiştir. Şekil 1'de, killi zeminin granülometre eğrisi gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Araştırmada kullanılan kilin granülometre eğrisi (Granulometer curve of the clay used in the study)

Uçucu Kül (Fly Ash)

Uçucu kül, termal enerji üretimi sürecinden kaynaklanan bir yan ürün olarak ortaya çıkar ve genellikle kömür yakma tesislerinde bulunur. Bu materyalin zayıf zemin sistemlerini iyileştirme açısından birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, uçucu külün maliyet açısından etkin bir malzeme olması dikkat çeker. Üretim tesislerinde yan ürün olarak elde edildiğinden, genellikle düşük maliyetle veya hatta ücretsiz olarak temin edilebilir. Bu, inşaat projelerinin maliyetini azaltarak bütçeye olumlu katkılar sağlar [27, 28]. İkinci olarak, uçucu külün kaolin killeriyle karıştırılması, zeminin mukavemetini ve dayanıklılığını artırır. Bu karışım, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirir ve temel ile

yol yapılarının taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda mühendislik yapılarının uzun ömürlülüğünü artırarak bakım maliyetlerini azaltır [29]. Üçüncü olarak, uçucu külün kullanımı çevresel faydalar sunar. Bu yan ürün, doğal kaynakların tükenmesini engeller ve çöplüklerde atık miktarını azaltır. Bu da sürdürülebilir bir çevre politikasına uyum sağlamaya yardımcı olur. Bu çalışma kapsamında, mineral katkı malzemesi olarak uçucu kül tercih edilmiştir, çünkü ekonomik ve sürdürülebilir bir malzeme olmasıyla birlikte kolayca elde edilebilir bir kaynaktan gelmektedir. Şekil 2'de, çalışmada kullanılan Bursa enerji santralinden temin edilen F sınıfı uçucu külün görüntüsü ve Tablo 1'de kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Uçucu külün kimyasal bileşenleri (Chemical components of fly ash)

	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Uçucu kül</b>	48,53%	2,28%	7,59%	9,48%	24,61%



**Şekil 2.** Araştırmada kullanılan F-sınıfı uçucu kül ve silis dumanı (F-class fly ash and silica fume used in the study)

#### *Silis Dumanı (Silica Fume)*

Silis dumanı, inşaat ve yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir ince toz malzemedir. Genellikle endüstriyel proseslerin bir yan ürünü olarak oluşur ve uygulamalarda çeşitli avantajlar sunar. Silis dumanı, genellikle amorf silika (silikon dioksit) olarak adlandırılan ince partiküllerden oluşur. Kimyasal olarak silikon (Si) ve oksijen (O) atomlarından meydana gelir. Silis dumanı partikülleri oldukça küçüktür ve genellikle mikron veya nano ölçekteki boyutlara sahiptir. Bu küçük partikül boyutu, malzemenin yüzey alanını artırır ve çeşitli uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Ayrıca, büyük bir yüzey alanına sahiptir. Bu özellik, kimyasal reaksiyonların ve bağlanmanın artmasına katkıda bulunur, bu da

malzemenin diğer malzemelerle iyi bir şekilde etkileşime girmesini sağlar. Silis dumanı, beton, harç, fibercement levhalar, polimer kompozitler ve diğer yapı malzemelerinde mükemmel bir katkı maddesi olarak kabul edilir. Öte yandan, katılaşma zamanını hızlandırma, mekanik dayanımı artırma, su geçirgenliğini azaltma, kimyasal reaksiyonlarla iyileştirme, çevresel faktörlere direnç sağlama, sürdürülebilirlik gibi özelliklerinden dolayı killi zeminlerin stabilizasyonunda sıklıkla tercih edilen malzemelerden biridir. Bu çalışma kapsamında, ikinci mineral katkı malzemesi olarak Antalya Eti Metalurji'den temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Şekil 2'de, çalışmada kullanılan silis dumanı ve Tablo 2'de kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Silis dumanının kimyasal bileşenleri (Chemical components of silica fume)

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO
<b>Silis dumanı</b>	0,40	94,10	1,50	0,90	94,10	0,40	0,90	0,10

#### *Cam elyaf (Fiberglass)*

Cam elyaf, cam malzemenin eritilip çekilerek ince elyaf veya iplikler haline getirilmesi sonucu elde edilen bir tür cam fiberdir. Cam elyafın özellikleri, camın dayanıklılığı ve mukavemeti ile öne çıkar. Cam elyaf, ağırlıkça hafif olmasına rağmen yüksek mukavemet, kimyasal dayanıklılık ve ısıya karşı dayanıklılık gibi birçok avantaja sahiptir. Cam elyaf, kolların mühendislik özelliklerinin stabilizasyonunda tercih edilen güçlü bir katkı maddesidir. Kil tabakasının mukavemet artışı,

çatlak direnci, su kararlılığı, sürdürülebilirlik, izolasyon, yük hafifletme gibi özellikler sunan çevre dostu bir malzemedir. Bu sayede, inşaat projelerinde daha güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü yapılar oluşturulması mümkün olur. Bu çalışmada kullanılan cam elyaf Fiber Elyaf Kompozitsan. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiş olup killi zemini stabilize etmek için kullanılmıştır. Şekil 3'de araştırmada kullanılan cam elyaf gösterilmiştir. Cam elyafın fiziksel özellikleri ise Tablo 3'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Cam elyafın fiziksel özellikleri (Physical properties of fiberglass)

	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Özgül Ağırlık	Uzunluk	Çap
<b>Cam Elyaf (Fiberglass)</b>	3400 MPa	77 GPa	2,66 g/cm <sup>3</sup>	6 mm	13 µ



Şekil 3. Araştırmada kullanılan cam elyaf (Fiberglass used in the study)

## 2.2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmanın temel amacı, kil stabilizasyonunda uçucu kül, silis dumanı ve cam elyafın etkisini farklı çevre koşulları için değerlendirerek karşılaştırmalı bir analiz sunmaktır. Bu anlamda, kil zemine değişen oranlarda (ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20) uçucu kül ve silis dumanı ayrıca farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %1, %1,5 ve %2) cam elyaf eklenerek her bir katkı malzemesinin etkisini değerlendirebilmek amacıyla katkılı numuneler

hazırlanmıştır. Bu katkı oranları daha önceki yıllarda yapılmış olan literatür çalışmalarının sonuçları göz önüne alınarak seçilmiştir. Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyafı stabilize edilmiş numunelerin fiziksel özelliklerini değerlendirebilmek için Atterberg limitleri ve Proktor deneyleri yapılmış ve ayrıca dayanım özelliklerini değerlendirmek için tek eksenli basınç (UCS) testleri farklı kür süreleri altında (0, 3, 7 ve 14 gün) yürütülmüştür. Deneysel program detaylarıyla Tablo 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Deneysel program (Experimental programme)

No	Numune	Su İçeriği (%)	Kür süresi (gün)	Test
S1	Z	%13,0: %17,30 : %20,0	0, 3, 7, 14	UCS Fiziksel Testler
S2	Z+%5SD	%13,0: %16,74: %20,0		
S3	Z+%10SD	%13,0: %16,59: %20,0		
S4	Z+%20SD	%13,0: %17,85: %20,0		
S5	Z+%5UK	%13,0: %16,09: %20,0		
S6	Z+%10UK	%13,0: %16,59: %20,0		
S7	Z+%20UK	%13,0: %16,82: %20,0		
S8	Z+%1CE	%13,0: %17,30 : %20,0		
S9	Z+%1,5CE	%13,0: %17,30 : %20,0		
S10	Z+%2CE	%13,0: %17,30 : %20,0		

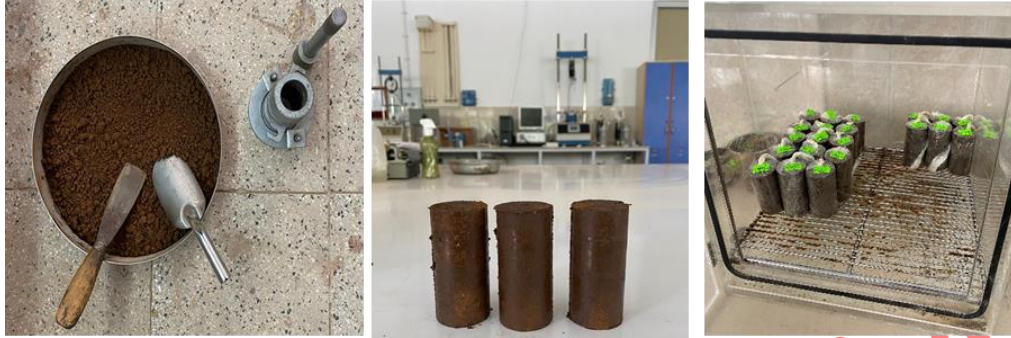
Z: zemin; UK: uçucu kül; SD: silis dumanı; CE: cam elyaf

Deney örneklerinin hazırlanma süreci Şekil 4'de gösterilmektedir. Kuru zeminin ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak farklı mineral katkı malzemeleri (uçucu kül ve silis dumanı) farklı oranlarda (%0, %5, %10 ve %20) kullanılmıştır. Katkılı zemin numunelerinin farklı su içeriği seviyelerinin numunelerin fiziksel ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için çalışmada optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden küçük ve büyük içeriklerde olmak üzere üç farklı su oranında UCS deneyleri yürütülmüştür (Tablo 4). Standart Proktor deneyi ile belirlenen kompaksiyon parametreleri, her farklı oran için eklenen farklı mineral katkı malzemesi (uçucu kül ve silis dumanı) miktarını hesaplamak için kullanılmıştır.

Numuneleri hazırlamak için kil ve mineral katkı malzemeleri kuru olarak karıştırılmıştır. Tablo 4'de sunulan optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) miktarlarına göre su, kil+uçucu kül ve kil+silis dumanı karışımlarıyla karıştırılmış ve karışımlardaki suyun kaybını önlemek için plastik torbalara konularak 24 saat boyunca saklanmıştır. Hazırlanan karışımların sıkıştırılması öncesinde su seviyesi tekrar kontrol edilmiştir. Kil+mineral katkı maddesi+su karışımlarından UCS deney numunelerini hazırlamak için Harvard minyatür tokmağı kullanılarak üç katman halinde sıkıştırılmıştır. Numunelerin ilk tabakası kalıba yerleştirilip sıkıştırılmış, ardından geriye kalan iki katman aynı şekilde ayrı ayrı yerleştirilerek sıkıştırılmış ve

deney numuneleri çapı 3.80 cm ve yüksekliği 7.60 cm olan boyutlarda hazırlanmıştır. Her örnek kalıptan çıkarılarak ve su içeriğini korumak için

hızla plastik torbalara konularak nem kaplarında muhafaza edilmiştir.

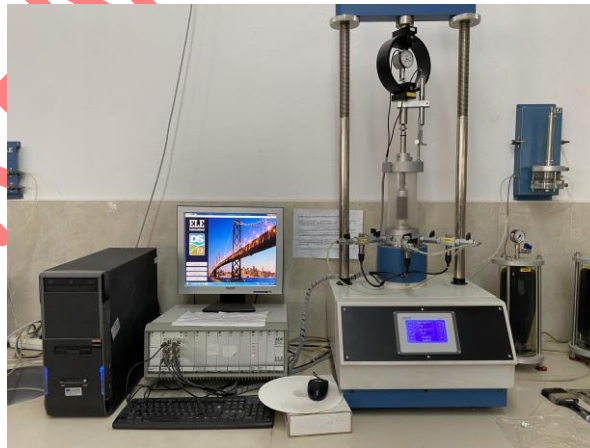


Şekil 4. Numune hazırlama süreci (Sample preparation process)

Öte yandan, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak farklı oranlarda (%0, %1, %1,5 ve %2) cam elyaf kullanılmıştır. Literatür çalışmaları ışığında, kil partikülleri ve cam elyaf fiber homojen karışmadıklarından bu tip malzemelerle takviye edilmiş zemin numunelerinin kompaksiyon parametrelerinin ( $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$ ) katkısız kil zeminlerle neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir [33, 34]. Yani cam elyaf fiberler kompaksiyon parametreleri üzerinde yok denecek kadar az etkiye sahiptir. Bundan dolayı bu çalışmada, kil numunelerde katkı malzemesi olarak cam elyaf kullanıldığında kompaksiyon parametrelerini değiştirmede kabul edilmiştir.

Serbest basınç dayanımı (UCS) prosedürü (Unconfined compression strength procedure)

Zeminlerin serbest basınç dayanımı, zemin davranışının tahmin edilmesi ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde kritik bir laboratuvar deneyidir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla, silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf katkılı kil numuneler üzerinde UCS testleri gerçekleştirilmiştir. UCS testleri, ASTM D2166 [35] standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Numunelerin UCS değerleri, Şekil 5’de gösterildiği gibi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı’nda bulunan üç eksenli test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Numuneler dakikada 0,760 mm’lik bir hızla yüklenmiştir. Yükleme işlemi, numune kırılana kadar tekrarlanmıştır.



Şekil 5. UCS deney aleti (UCS test apparatus)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

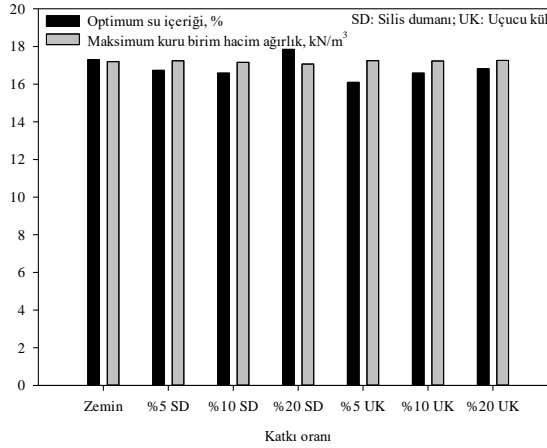
#### 3.1. Katkı malzemelerinin killerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi (Effect of additives on the physical properties of clays)

Bu çalışmada, farklı karışım oranlarında kullanılan mineral katkı malzemelerinden uçucu kül ve silis dumanının doğal kil zeminin fiziksel özelliklerine etkisi ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, kompaksiyon parametreleri [36] ve Atterberg limitleri [37] ilgili ASTM standartlarına uygun olarak yürütülmüş ve sonuçları bu bölümde tartışılmıştır.



Şekil 6'da farklı karışım oranlarında uçucu kül ve silis dumanı katkılı kil numunelerinin kompaksiyon parametrelerindeki değişimi ( $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$ ) gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi killi zemine mineral katkı malzemelerinin eklenmesiyle karışımların  $\gamma_{kmax}$  değerleri az miktarda artarken,  $w_{opt}$  değerlerinde düşüş görülmektedir. Sonuçlar, her iki katkı yüzdesi oranlarının %5'e artışı maksimum kuru yoğunluk değerindeki artış oranını arttırırken, optimum su içeriği oranını azaltmaktadır. Optimum su içeriğindeki azalma, kilin yerini su parçacıklarına karşı daha düşük afiniteye sahip olan mineral katkı malzemesinin alması nedeniyle açıklanabilir.

Öte yandan, killi zemin numunesine %20 oranında silis dumanı eklenmesi, daha yüksek özgül ağırlığa sahip karışım elde edilmesinden dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlığın azalmasına yol açmıştır. Ayrıca silis dumanı numunelere kil zeminden daha



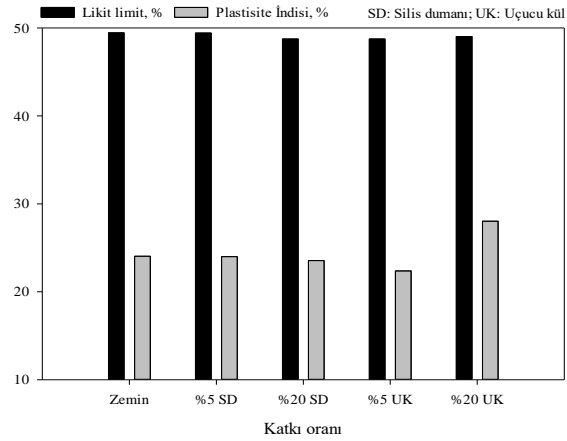
Şekil 6. Kompaksiyon parametrelerinin katkı malzemelerine göre değişimi (Variation of compaction parameters according to additives)

### 3.2. Katkı malzemelerinin serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkileri (Effects of additives on the UCS)

Şekil 8'de, farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin serbest basınç dayanımı değerleri farklı su içerikleri ve kür sürelerine göre gösterilmektedir. Killi zeminin UCS yenilme mukavemeti su içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Bazı araştırmacılar [38] su içeriğinde de benzer bir eğilim bulmuş, ancak bazıları [39, 40] su içeriği arttıkça basınç dayanımının önce arttığını, sonra azaldığını ortaya koymuştur. Düşük su içeriklerinde hazırlanan kil numuneler üzerinde maksimum UCS değerleri gözlenmiştir. Ayrıca katkı oranı ilavesi, kür süresinin arttırılması gibi etkenlerde numunelerin UCS değerlerini doğal kil numunelere göre arttırmıştır.

büyük bir yüzey alanı sağlamaktadır. Bu, optimum su içeriğinin yükseltilmesinden önce karışımları sıkılaştırmak için ek suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Şekil 7'de farklı mineral katkı oranının kil zeminlerin kıvam limitlerine etkisi gösterilmektedir. Silis dumanı ve uçucu kül oranlarının artması ile doğal kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bunun nedeni, mineral katkı malzemelerinin, çimento değeri az olan ve büyük parçacıklara sahip olan tüm kil parçacıklarını kaplaması ve bağlaması olabilir. Bu etki ise mineral katkı malzemesi ile alüminli malzemeler arasındaki puzolanik reaksiyon ile ifade edilmektedir [41]. Doğal kil zemine %20 oranında silis dumanı ilavesi plastisite indeksini %2,080 azaltırken, %20 uçucu kül ilavesi %0,042 azaltmaktadır.



Şekil 7. Kıvam limitlerinin katkı malzemelerine göre değişimi (Variation of consistency limits according to additives)

Optimum su içeriğinden küçük su içeriklerindeki kil numuneleri optimum numunelere göre daha büyük UCS dayanımına sahipken, mineral katkı ve liflerin varlığı da UCS dayanımını doğal kil numunelere göre arttırmıştır. Maksimum UCS dayanımları mineral katkı malzemeleri için düşük karışım oranlarında elde edilirken, lif katkısı için yüksek oranlarda elde edilmiştir. %5 silis dumanı katkısı kil numunelerin UCS dayanımını %102,86 oranında arttırırken, %5 uçucu kül katkısı ise %87,23 oranında arttırmıştır. %2 oranında cam elyaf eklenmesi ise kil numunelerin UCS dayanımı %175,74 oranında iyileştirmiştir. Öte yandan, maksimum sayıda kür süresine maruz kalan numunelerin her iki mineral katkı oranının %10'a arttırılmasıyla UCS değerleri artmıştır. Yani %10 silis dumanı katkısı ve %10 uçucu kül katkısı %13 su içeriğine sahip kil numunelerinin maksimum

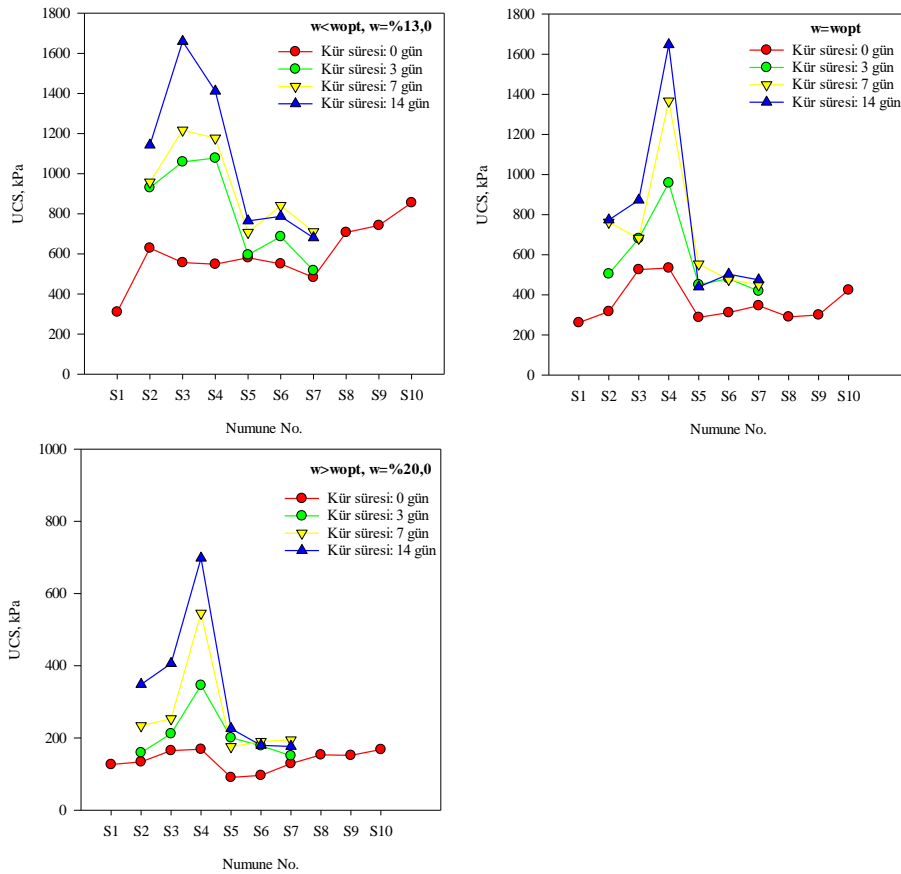
sayıda kür sonrası optimum oranını yansıtmaktadır. Mineral katkı oranının %20'ye artırılması UCS dayanımlarında azalma göstermiştir.

Optimum su içeriklerinde hazırlanan numunelerde kür öncesi, maksimum karışım oranında (%20) eklenen silis dumanı UCS değerini %104,28 oranında arttırırken, maksimum karışım oranında (%20) ise %32,48 oranında ve maksimum karışım oranında (%2) cam elyaf eklenmesi ise %62,21 oranında kil numunelerin UCS değerini arttırdığı gözlenmiştir. Aynı su içeriğinde kür süresinin artışı numunelerin UCS değerini büyük oranda arttırırken maksimum UCS değeri %20 katkı silis dumanı ve %10 katkı oranlı uçucu kül numunelerinde elde edilmiştir.

Optimum su içeriklerinden daha büyük su içeriklerinde ( $w > w_{opt}$ ) hazırlanan numunelerde kür öncesi UCS değerleri optimum oranda hazırlanan numunelere göre azalmıştır. Silis dumanı ve uçucu külün maksimum oranları bu su içeriğinde maksimum UCS değerine sahipken silis dumanı UCS değerini %16,20 oranında, uçucu kül ise %2,06 oranında arttırmıştır. Ayrıca maksimum karışım oranında eklenen (%2) cam elyaf ise %32,92 oranında kil numunelerin UCS değerini arttırmıştır. Yüksek su içeriğinde kür süresinin artışı

numunelerin UCS değerini büyük oranda arttırırken maksimum UCS değeri %20 katkı silis dumanı ve %5 katkı oranlı uçucu kül numunelerinde elde edilmiştir. Uçucu külün belirli bir miktarı kil numunelerinin mekanik özelliklerini artırabilir. Ancak, bu artış belirli bir optimum uçucu kül oranıyla sınırlı olabilir. Optimum oranın üzerine eklenen uçucu kül, numunelerin mekanik özelliklerini negatif yönde etkilediği görülmektedir. Öte yandan, %20 uçucu kül oranı kil yapısındaki dengeyi bozarak dayanıklılığın azalmasına neden olmuştur.

Optimum su içeriğine sahip %5 silis dumanıyla hazırlanan zemin numunesinin 3 günlük kür süresi sonunda dayanımında %58,98'lik bir artış olmuştur. 7 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %140,1, 14 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %143,65'lik bir artış olmuştur. Optimum su içeriğine sahip %20 uçucu kül ilaveli zemin numunesinin 3 günlük kür süresi sonunda dayanımında %20,89'luk bir artış olmuştur. 7 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %29,97, 14 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %37,11'lik bir artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan kür süreleri zeminin dayanımının artmasına katkıda bulunmuştur.



**Şekil 8.** Farklı su içeriklerinde ve kür sürelerinde katkı malzemelerinin kilin UCS performansı üzerine etkisi (Effect of additives at different water contents and curing times on UCS performance of clay)

### 3.3. Katkı malzemelerinin kilin kırılma indeksi (IB) ve sekant modülü (Es50) üzerine etkileri (Effects of additives on brittleness index (IB) and secant modulus (Es50) of clay)

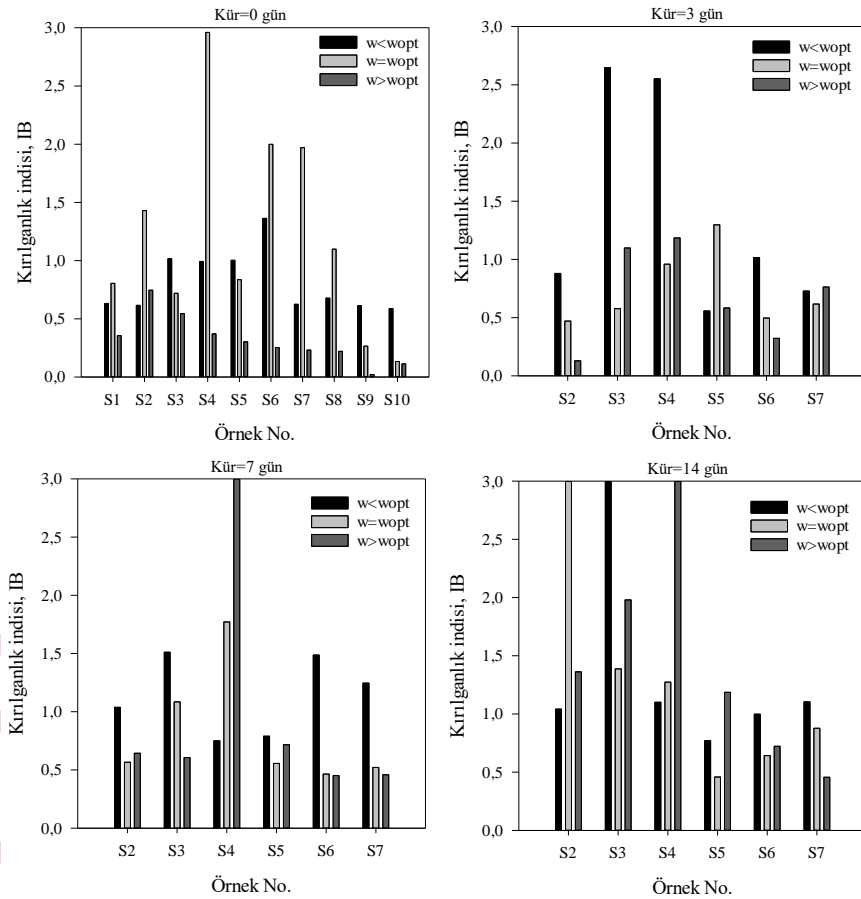
Kil numunelerine farklı su içeriklerinde silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf ilavesi, serbest basınç davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olup numunelerin kırılma davranışında değişikliklere yol açmıştır. Numunelerin sünek ve kırılma özelliklerini açıklamak için, Denklem 1'de sunulan kırılma indeksi (IB) formülü kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 9'da sunulmuştur.

$$IB = \frac{q_f}{q_{ult}} - 1 \quad (1)$$

$q_f$ : UCS yenilme;  $q_{ult}$ : nihai UCS. IB değerleri sıfıra yaklaştıkça, numuneler gerilme-şekil değiştirme

eğrilerinde daha sünek bir yenilme davranışı sergilerken; uzaklaştıkça daha gevrek bir kırılma gözlenir [42].

Şekil 9'da gösterilen kırılma indeksi değerlerine göre optimum su içeriğinde doğal kil numunelere silis dumanı ve uçucu kül eklenmesi numuneyi daha kırılma hale getirmektedir. Silis dumanı ve uçucu kül, kil numunesinin kimyasal bileşimini değiştirerek, kil minerallerinin daha sıkı bir şekilde bir arada tutulmasını zorlaştırabilir, bu da numunenin daha kolay kırılmasına yol açar. Öte yandan, düşük su içeriğindeki kil numunesi optimum su içeriğindeki duruma göre daha sünek bir davranış sergilerken, yüksek su içeriğindeki kil numuneleri optimum ve düşük su içeriğindeki duruma göre daha sünek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 9. Katkılı kil numunelerin kırılma indeksi değerleri (Brittleness index values of reinforced clay samples)

Kil mineralleri, su molekülleri ile etkileşime girerken farklı yapısal değişiklikler yaşayabilirler ve bu, kil numunelerinin davranışını etkiler. Düşük su içeriğine sahip kil numuneleri arasındaki kimyasal bağlar daha güçlüdür. Su miktarının sınırlı olması, kil minerallerinin daha yakın bir şekilde bir arada kalmasına ve numunenin sert ve kırılğan olmasına neden olabilir. Bu nedenle, düşük su içeriğine sahip kil numuneleri daha az sünek olabilir ve çatlama eğiliminde olabilirler. Yüksek su içeriğine sahip kil numunelerindeki fazla su, kil minerallerinin arasında kimyasal bağları zayıflatabilir. Bu, numunenin daha esnek ve plastik bir davranış sergilemesine neden olabilir.

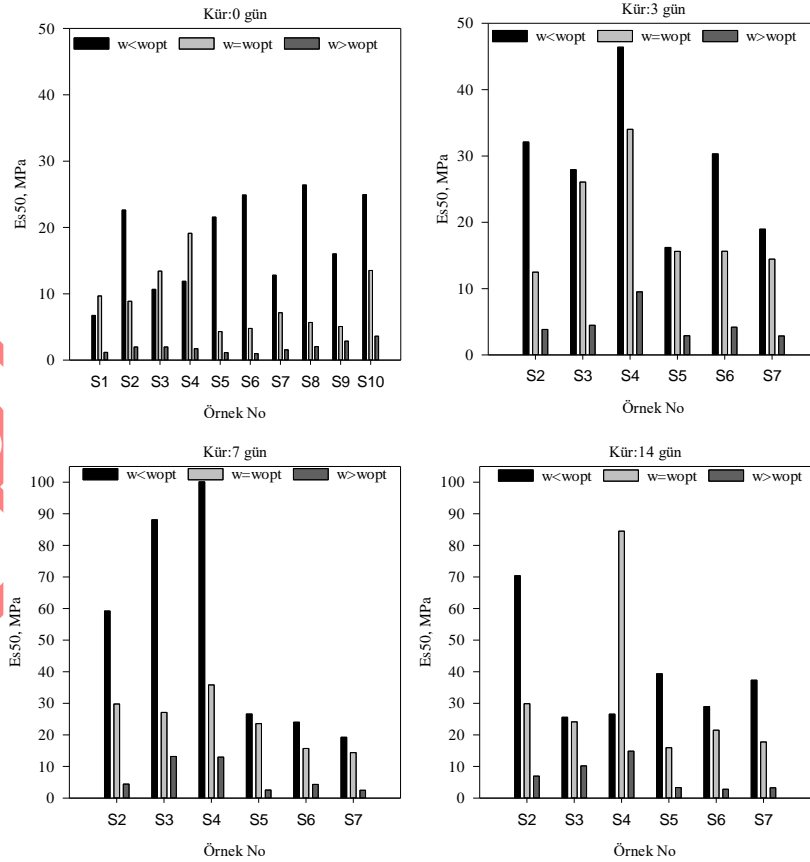
Kil numunelerin uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf ilavesi ile farklı su içeriklerinde ve farklı kür süreleri altında farklı davranışlar sergilediği görülmüştür. Katkı malzemelerinin ilavesi ile optimum su içeriğinden daha yüksek içerikte hazırlanan numuneler diğer su içeriklerine göre sünek davranış sergilerken, optimum oranda hazırlanan katkıli numuneler en gevrek davranış sergilemiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan katkıli numunelere göre maksimum kür süresi sonunda maksimum oranda eklenen silis dumanı

numune davranışını daha sünek hale getirirken, uçucu külün maksimum oranı numuneyi daha gevrek hale getirmektedir. Her iki katkı malzemesi içinde kil malzemesi maksimum kürlenme ile daha sünek hale gelmiştir.

Zeminin ortalama rijitliğini temsil eden sekant modülü ( $E_{s50}$ ), zemin malzemeleri için önemli bir tasarım parametresidir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki belirli bir noktada aksel gerilmenin karşılık geldiği aksel şekil değiştirmeye oranının hesaplanmasıyla belirlenir. Başka bir deyişle, sekant modülü, sıfır noktasından tepe deviyör gerilmesinin yarısı veya üçte biri olan deviyör gerilmesine kadar olan eğrinin eğimi olarak tanımlanır [43, 44]. Bu çalışmada sekant modülü, Denklem 2'de belirtildiği gibi numunenin serbest basınç dayanımının %50'sine karşılık gelen nokta kullanılarak her bir numune için hesaplanmıştır [45].

$$E_{s50} = \frac{\Delta q_{50\%}}{\Delta \varepsilon_{50\%}} \quad (2)$$

burada  $\Delta q_{50\%}$ , numunenin UCS' sinin %50'sine ilişkin değerdir ve  $\Delta \varepsilon_{50\%}$ , numunenin UCS' sinin yarısına karşılık gelen gerilimi ifade eder



Şekil 10. Katkıli kil numunelerin sekant modülü değerleri (Secant modulus values of reinforced clay specimens)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında, kil zeminlerin stabilizasyonu için uçucu kül, silis dumanı ve cam fiberin farklı kombinasyonları kullanılarak, zeminlerin fiziksel özellikleri ve tek eksenli yükleme altındaki dayanımları incelenmiştir. Çalışmadan çıkarılan temel sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Uçucu kül ve silis dumanı katkıları, kil zeminin kompaksiyon parametreleri üzerinde belirgin etkilere neden olmuştur. Karışım oranlarındaki artış, maksimum kuru birim hacim ağırlığını artırmış, ancak optimum su içeriği değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Bu sonuç, uçucu külün kil partiküllerinin yerini alarak kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiğini ve daha yoğun bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Öte yandan, %20 oranında silis dumanı eklenmesinin daha yüksek özgül ağırlığa sahip bir karışım elde edilmesine rağmen maksimum kuru birim hacim ağırlığının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Silis dumanı numunelere kil zeminden daha büyük bir yüzey alanı sağlamaktadır, bu da optimum su içeriğini yükseltmeden önce karışımları sıkıştırmak için ek suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

- Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, doğal kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, mineral katkı malzemelerinin kil parçacıklarını kaplayarak ve bağlayarak kil zeminin plastisitesini azaltmasıyla açıklanmaktadır. Silis dumanının %20 oranında eklenmesi plastisite indeksini %2,080 azaltırken, %20 uçucu kül eklenmesi %0,042 azaltmaktadır. Bu bulgular, katkı maddelerinin kilin serbest hareketini kısıtlayarak daha stabil bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

- Serbest basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, su içeriği arttıkça killi zeminin UCS yenilme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Optimum su içeriğinden düşük su içeriğine sahip kil numuneleri daha büyük UCS dayanımına sahipken, mineral katkı ve lif eklenmesi UCS dayanımını artırmıştır. Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin UCS değerleri, su içeriğindeki artışa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Maksimum UCS dayanımları düşük karışım oranlarındaki mineral katkı malzemeleri için elde edilirken, lif için yüksek oranlarda görülmüştür. Su içeriğindeki artışın basınç dayanımını azalttığı gözlenmiş; ancak katkı oranının ve kür süresinin artmasıyla numunelerin dayanımı artmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, kil numunelerini daha kırılğan hale getirmiştir. Düşük su içeriğindeki numuneler daha kırılğan, yüksek su içeriğindeki numuneler ise

daha sünek bir davranış sergilemiştir. Serbest basınç dayanımı değerleri, su içeriği ve katkı maddesi oranlarıyla yakından ilişkilidir.

Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin UCS değerleri, su içeriğindeki artışa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Özellikle, düşük karışım oranlarındaki mineral katkılar maksimum UCS dayanımları sağlarken, cam elyaf için yüksek oranlarda daha fazla dayanım elde edilmiştir. Bu durum, katkı maddelerinin zemin matrisini güçlendirerek dayanım artışı sağladığını göstermektedir. Ancak, su içeriğinin artması basınç dayanımını azaltmakta, bu da su miktarının kontrolünün önemini vurgulamaktadır.

- Uçucu kül katkılı zemin numunelerinde belirli bir orana kadar artan uçucu kül miktarıyla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak belirli oranı aştığında bu serbest basınç dayanım değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum uçucu külün optimum değerini aştığında zeminin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

- Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf eklenen kil numunelerinin kırılğanlık indeksi değerleri incelendiğinde, optimum su içeriğinde doğal kil numunelerine göre daha kırılğan hale geldiği görülmüştür. Bu durum, katkı malzemelerinin kil minerallerinin bir arada tutulmasını zorlaştırarak numunenin daha kolay kırılmasına neden olabileceğini göstermektedir. Bu kırılğanlık, zemin stabilizasyonunda dikkate alınması gereken bir faktördür, çünkü yapıların uzun vadeli dayanıklılığı ve performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

- Sekant modülü (Es50) değerleri, farklı katkı oranları, kür süreleri ve su içerikleri altında incelenmiştir. Bulgular, farklı katkı maddelerinin farklı oranlarının doğal kil numunelerinin sekant modülü değerlerini artırdığını göstermektedir. Kür öncesi, düşük su içeriğinde hazırlanan kil numunelerine cam elyaf eklenmesinin Es50 değerlerini mineral katkı malzemelerine göre daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Kür süresinin artmasıyla katkılı numunelerin sekant modülü değerlerinde artış gözlenmiş, maksimum artışlar düşük su içeriğinde hazırlanan numunelerde görülmüştür. Silis dumanının UCS değerlerine daha fazla etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, katkı maddelerinin zemin sertliğini ve elastikiyetini artırarak zemin stabilizasyonunu iyileştirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, mineral katkı malzemelerinin ve cam elyaf lifinin kil zeminin fiziksel ve mekanik

özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğu ve bu etkilerin karışım oranları, su içeriği ve kür süreleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, yapı mühendisliği ve zemin stabilizasyonu gibi alanlarda malzeme tasarımı ve uygulama süreçlerini iyileştirmek için önemli bilgiler sağlamaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FUBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No. TEKF.23.52). FUBAP'ın sağladığı mali destek için teşekkür ederiz.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Nagihan DOĞAN:** Bu çalışma yayınlanmamış Yüksek Lisans tezinin bir bölümünü oluşturmaktadır olup, ilgili yazar tez sahibidir. Deneysel çalışmanın planlanması, veri analizi ve deneysel çalışmanın yürütülmesinden sorumludur.

This study forms part of an unpublished Master's thesis and the corresponding author is the thesis author. Responsible for the planning, analysis and execution of the experimental study.

**Müge Elif FIRAT:** Tez çalışması danışmanı olup, deney sonuçlarının analizi ve ilgili makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She was the thesis advisor, analyzed the experimental results and wrote the related manuscript.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sengul T., Akray N., Vitosoglu Y., Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils, *Construction and Building Materials*, 400 (2023), 132590.
- [2] Miraki H., Shariatmadari N., Ghadir P., Jahandari S., Tao Z., Siddique R., Clayey soil

stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2) (2022), 576-591.

- [3] de Araújo M.T., Ferrazzo S.T., Chaves H.M., da Rocha C.G., Consoli N.C., Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 362 (2023), 129757.
- [4] Odeh N.A., Al-Rkaby A.H., Strength, durability, and microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022), e00988.
- [5] Naeimi M., Chu J., Khosroshahi M., Zenouzi L.K., Soil stabilization for dunes fixation using microbially induced calcium carbonate precipitation, *Geoderma*, 429 (2023), 116183.
- [6] MC Fernandes V., Rudgers J.A., Collins S.L., Garcia-Pichel F., Rainfall pulse regime drives biomass and community composition in biological soil crusts, *Ecology*, 103(9) (2022), e3744.
- [7] Armistead S.J., Smith C.C., Stanilan S.S., Sustainable biopolymer soil stabilization in saline rich, arid conditions: A 'micro to macro' approach. *Scientific Reports*, 12(1), (2022), 2880.
- [8] Saldanha R.B., Carlos H., Filho S., Mallmann J.E.C., Consoli N.C., Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), (2018).
- [9] Wang D., Fonte S.J., Parikh S.J., Six J., Scow K.M., Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates, *Geoderma*, 303, (2017) 110-117.
- [10] Bahadori H., Hasheminezhad A., Taghizadeh F., experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), (2019).
- [11] Jalal F.E., Xu Y., Jamhiri B., Memon S.A., On the recent trends in expansive soil stabilization using calcium-based stabilizer materials (CSMs): A comprehensive review, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2020), 1510969.
- [12] Dayioglu M., Cetin B., Nam S., Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives, *Applied Clay Science*, 146(2017), 56-69.
- [13] Anburuvel A., The engineering behind soil stabilization with additives: A state-of-the-art review, *Geotechnical and Geological Engineering*, (2023), 1-42.

- [14] Ghiasi V., Haghtalab Joraghani M., Rashno S., An overview of chemical soil stabilization methods. *Road*, 31(116), (2023),151-166.
- [15] Vichan S., Rachan R., Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash, *Soils and Foundations*, 53(2), (2013), 272–281.
- [16] Chen C., Wei K., Gu J., Huang X., Dai X., Liu, Q., Combined effect of biopolymer and fiber inclusions on unconfined compressive strength of soft soil, *Polymers*, 14(4), (2022),787.
- [17] Wang C., Li Z., Cai B., Tan Q., Li Y., He L., ... Deng, Y., Effect of root system of the *Dicranopteris dichotoma* on the soil unconfined compressive strength of collapsing walls in hilly granite area of South China, *Catena*, 216(2022), 106411.
- [18] Ghasem Ghanbari P., Momeni M., Mousivand M., Bayat M., Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre, *International Journal of Engineering*, 35(5), (2022), 1089-1095.
- [19] Mojtahedi F. S.F., Ahmadihosseini A., Sadeghi H., An artificial intelligence based data-driven method for forecasting unconfined compressive strength of cement stabilized soil by deep mixing technique, *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(1), (2023), 491-514.
- [20] Totiç E., Göktepe F., Yaşar M., Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), (2019), 769-778.
- [21] Türköz M., Savaş H., Tasci G., The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features, *Arabian Journal of Geosciences*, (2018), 11:735.
- [22] Rajabi A.M., Ghorashi S.M.S., Yeganeh M.M., The effect of polypropylene and glass fibers on strength and failure behavior of clayey sand soil, *Arabian Journal of Geosciences*, (2023), 16:6.
- [23] Moreira E.B., Baldovino J.A., Rose J.L., dos Santos Izzo R.L., Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), (2019), 369-378.
- [24] Bilici H., Okur D.V., Türköz M., Savaş H., Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), (2020), 910-919.
- [25] Çimen, Ö. Keleş, E., Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), (2020), 80-90.
- [26] Şahbaz İ., Ünsever Y.S., Çimento ve polipropilen lif kullanarak düşük plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), (2020), 1409-1420.
- [27] Shourijeh P.T., Rad A.M., Bigloo F.H.B., Binesh S.M. Application of recycled concrete aggregates for stabilization of clay reinforced with recycled tire polymer fibers and glass fibers, *Construction and Building Materials*, 355(2022), 129172.
- [28] Valipour M., Shourijeh P.T., Mohammadinia A., Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement, *Transportation geotechnics*, 27(2021), 100474.
- [29] Xu L., Niu L., Influence of fibre type on unconfined compressive strength of fibre-reinforced cemented soil under freeze-thaw cycling, *International Journal of Materials and Product Technology*, 65(3), (2022), 248-257.
- [30] Baştan E.E., Demir G., Şişen Zemin özelliklerinin atık malzemeler ile iyileştirilmesi. *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 2(1), (2022), 25-36.
- [31] Çınar M., Erbaşı K. Zemin iyileştirmesinde kullanılan jet grout yönteminde çimento yerine ikame edilen atık malzemelerin mekanik ve reolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi: literatür araştırması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), (2023). 1742-1767.
- [32] Topçuoğlu Y.A., Gürocak Z. Uçucu Kül, silis dumani ve tuf ile stabilize edilmiş bentonitte meydana gelen moleküler değişimlerin fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ft-ır) yöntemi ile belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), (2023), 94-112.
- [33] Rabab'ah S., Al Hattamleh O., Aldeeky H., Alfoul B.A. Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 14, (2021), e00485.
- [34] Orakoglu M. E., Liu J., Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(2017), 2128-2140.
- [35] ASTM D2166-06(2021), Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org.
- [36] ASTM D698-00ae1, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-

- m/m<sup>3</sup>)), West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [37] ASTM D4318-10e1, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [38] Mirzababaei M., Mirafteb M., Mohamed M., McMahon P., Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), (2013), 483-493.
- [39] Patel S.K., Singh B., Strength and deformation behavior of fiber-reinforced cohesive soil under varying moisture and compaction states. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), (2017), 1767-1781.
- [40] Nataraj M., McManis K., Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers, *Geosynthetics International*, 4(1), (1997), 65-79.
- [41] Al-Soudany K., Remediation of clayey soil using silica fume. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01017), (2018), EDP Sciences.
- [42] Consoli N.C., Lopes Jr L.D.S., Prietto P.D. M., Festugato L., Cruz R.C. Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(6), (2011), 628-632.
- [43] Jahandari S., Mojtahedi S.F., Zivari F., Jafari M., Mahmoudi M.R., Shokrgozar A., ... Jalalifar H., The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), (2022), 269-281.
- [44] Venkata Vydehi K., Moghal A.A.B., Effect of biopolymer inclusion and curing conditions on the failure strain and elastic modulus of cohesive soil. In *Indian Geotechnical Conference* (pp. 257-264). 2023, Springer, Singapore.
- [45] Saberian M., Jahandari S., Li J., Zivari F., Effect of curing, capillary action, and groundwater level increment on geotechnical properties of lime concrete: experimental and prediction studies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), (2017), 638e47.