



## Using fly ash and volcanic tuff along with lime for stabilizing high plasticity clay soil

Ömür Çimen\*<sup>ID</sup>, Erhan Keleş<sup>ID</sup>

Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 32200, Isparta, Türkiye

### Highlights:

- Effect of fly ash and volcanic tuff on some properties of clay soil
- Using fly ash and volcanic tuff with lime to stabilize clay soil
- Impact of curing period on unconfined compressive strength

### Keywords:

- Clay soil stabilization
- Fly ash
- Volcanic tuff
- Lime

### Article Info:

Research Article

Received: 22.02.2024

Accepted: 03.11.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1441636

### Correspondence:

Author: Ömür Çimen

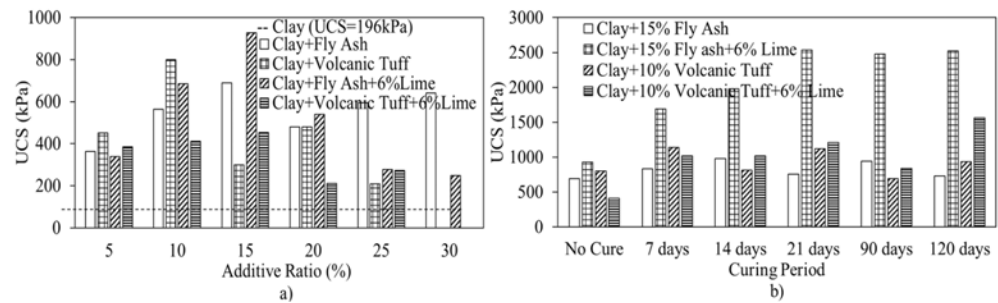
e-mail:

omurcimen@sdu.edu.tr

phone: +90 246 211 1202

### Graphical/Tabular Abstract

The process of chemical stabilization can significantly alter many engineering properties of soil. Various additives can be used in the chemical stabilization of high-plasticity clay soil. The additive materials are used both individually and in combination. In this study, we examined the impact of fly ash, volcanic tuff, and 6% lime on the engineering properties of clay. The study includes the evaluation of the unconfined compressive strength of clay for different additive ratios and the changes in unconfined compressive strength concerning different curing periods, as shown in Figure A.



**Figure A.** Variation of unconfined compressive strength for different additive ratios (a) and various curing periods (b)

**Purpose:** The study aims to investigate the impact of using fly ash, volcanic tuff, and lime in the chemical stabilization of highly plastic clay.

**Theory and Methods:** In this study, fly ash and volcanic tuff were mixed separately with high-plasticity clay, and experiments were carried out. Then, in addition to these additives, 6% lime was added, and the same experiments were repeated. The study investigated the impact of additives on various properties of clay, including consistency limits, maximum dry unit weight, optimum water content, and unconfined compressive strength. ASTM D1140, ASTM D422, ASTM D854, ASTM D698, ASTM D4318, and ASTM D2166/D2166M-16 standards were applied in the experiments. The additive ratios that gave the highest unconfined compressive strength were selected, and samples were prepared for these ratios. The samples were dry-cured for 7, 14, 21, 90, and 120 days and then unconfined pressure tests were performed on the samples.

**Results:** Clay + fly ash samples were created by mixing fly ash with clay at weight ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%. Clay + volcanic tuff samples were also prepared by mixing volcanic tuff with clay at weight ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, and 25%. Then, the experiments were repeated for the same fly ash and volcanic tuff ratios, while keeping the optimal lime ratio of 6% constant. The addition of fly ash reduced the liquid limit, and plasticity index while increasing the unconfined compressive strength. Similarly, the addition of volcanic tuff resulted in reduced liquid limit and plasticity index of the clay, along with increased unconfined compressive strength. Adding 6% lime to these additives improved the engineering properties of the mixtures more effectively. For each additive, the ratios that yielded the highest unconfined compressive strength were identified as Clay+ 15% fly ash, Clay+10% volcanic tuff, Clay+15% fly ash+6% lime, and Clay+10% volcanic tuff+6% lime. An increase in the unconfined compressive strength of the samples was observed with increasing curing time (7, 14, 21, 90, and 120 days).

**Conclusion:** It has been demonstrated that fly ash and volcanic tuff can be utilized for stabilizing high-plasticity clay soil. It has also been found that adding lime at the optimal rate enhances the success of stabilizing these materials.



## Yüksek plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda uçucu kül ve volkanik tüfün kireç ile birlikte kullanılması

Ömür Çimen\*<sup>ID</sup>, Erhan Keleş<sup>ID</sup>

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Kil zeminin bazı özelliklerine uçucu kül ve volkanik tüf etkisi
- Kil zemin stabilizasyonunda uçucu kül ve volkanik tüfün kireç ile birlikte kullanılması
- Kür süresinin serbest basınç mukavemetine etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.02.2024

Kabul: 03.11.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1441636

### Anahtar Kelimeler:

Kil zemin stabilizasyonu,  
uçucu kül,  
volkanik tüf,  
kireç

### ÖZ

Bu çalışmada, Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külünün ve Bitlis volkanik tüfünün yüksek plastisiteli kil zeminin stabilizasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, kile %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül ve %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında volkanik tüf ayrı ayrı karıştırılmıştır. İkinci aşamada, %6 kireç ilave edilerek aynı katkı oranları için numuneler tekrar hazırlanmıştır. Böylece, kireç katkısız ve kireç katkılı bütün oranlar için kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Kullanılan katkıların kilin serbest basınç mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Uçucu kül ve volkanik tüfün kireç ile birlikte kullanılmasında ise stabilizasyon performansının daha da arttığı belirlenmiştir. Bu deneylerden yararlanılarak her bir katkı çeşidi için ideal katkı oranları bulunmuştur. Afşin-Elbistan uçucu külü için ideal katkı oranı %15, Bitlis volkanik tüfü için ideal katkı oranı ise %10 olarak elde edilmiştir. Üçüncü aşamada, katkılı kil numunelerinin serbest basınç mukavemetine kür etkisi incelenmiştir. Belirlenen ideal katkı oranlarında hem kireçli hem de kireçsiz numunelerde 7, 14, 21, 90 ve 120 gün kür süreleri uygulanmıştır. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetinin kürsüz duruma göre arttığı belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, önerilen katkıların yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği öngörülmektedir.

## Using fly ash and volcanic tuff along with lime for stabilizing high plasticity clay soil

### H I G H L I G H T S

- Effect of fly ash and volcanic tuff on some properties of clay soil
- Using fly ash and volcanic tuff with lime to stabilize clay soil
- Impact of curing period on unconfined compressive strength

### Article Info

Research Article

Received: 22.02.2024

Accepted: 03.11.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1441636

### Keywords:

Clay soil stabilization,  
fly ash,  
volcanic tuff,  
lime

### ABSTRACT

This study explores the potential of using fly ash from the Afşin-Elbistan thermal power plant and Bitlis volcanic tuff for stabilizing high-plasticity clay soil. The study consists of three stages. In the first stage, fly ash at the rates of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% and volcanic tuff at the rates of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% were mixed separately into the clay. In the second stage, samples were prepared with the same contribution rates of fly ash and volcanic tuff, but with the addition of 6% lime. Various tests, including consistency limits, standard compaction, and unconfined pressure, were conducted for all combinations, both with and without lime additives. The results indicated that usage of these additives increased its unconfined compressive strength. Furthermore, it was observed that the stabilizing effect was enhanced when fly ash and volcanic tuff were used together with lime. The ideal contribution rate for Afşin-Elbistan fly ash was obtained at 15% and for Bitlis volcanic tuff at 10%. In the third stage, the effect of curing on the unconfined compressive strength of the blended clay samples was investigated. Curing periods of 7, 14, 21, 90, and 120 days were applied to both lime and non-lime samples at the ideal additive ratios. The results demonstrated that the unconfined compressive strength increased with longer curing periods compared to samples that were not cured. Based on these findings, it is anticipated that the suggested additives can effectively improve high-plasticity clay soils.

## 1. Giriş (Introduction)

Killi zeminler, özellikle mevsimsel yağış alan bölgelerde genellikle yüksek plastisite, düşük geçirgenlik ve düşük taşıma kapasitesi gibi sorunlara neden olur. Bu nedenle zemin stabilizasyon tekniklerini dahil ederek, bu zeminlerin davranışının iyileştirilmesine ihtiyaç vardır [1]. Zemin stabilizasyonu, zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yapılacak olan mühendislik yapısının özelliklerini karşılayacak şekilde iyileştirmek amacıyla, zemine belirli malzemelerin eklenmesini içeren bir tekniktir [2]. Genel olarak mekanik-fiziksel stabilizasyon ve kimyasal stabilizasyon olarak iki gruba ayrılır. Mekanik-fiziksel stabilizasyon durumunda zeminin kimyasal yapısı değişmeden performansı artırılırken, kimyasal stabilizasyon durumunda zeminde kısa ve uzun süreli reaksiyonların meydana gelmesi sağlanır ve bu da zeminin performansının artmasına neden olur [3]. Mekanik-fiziksel stabilizasyon, sıkıştırma, ön ıslatma, güçlendirme ve elektro-kinetik işlemi içerirken, kimyasal stabilizasyon zemine katkı malzemelerinin eklenmesiyle sağlanır. Kimyasal stabilizasyon için zemine karıştırılan katkı malzemeleri; geleneksel (çimento, kireç ve uçucu kül), geleneksel olmayan (sülfonatlı yağlar, polimerler, tuz ve enzimler) ve yan ürün olanlar (Portland çimento tozu, kireç fırını tozu ve cürüfler) olarak üç gruba ayrılabilir [4]. Bu kimyasal katkı maddeleri tek tek uygulandığında zeminin performansında önemli bir iyileşme sağlayabilir; ancak bunların bir arada uygulanması zeminin stabilizasyon performansını daha da yüksek bir düzeye çıkarabilmektedir [5]. Sürdürülebilir bir zemin stabilizasyonu için uygun miktarda karıştırılan katkı malzemesi ile zeminin reaksiyona girmesi kimyasal stabilizasyonun amaçlarındandır [6].

Kil zeminlerin kimyasal stabilizasyonu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde; uçucu kül [7-9], uçucu kül ve kireç [10], uçucu kül ve çimento [11], uçucu kül ve sentetik fiber [12], atık mermer tozu [13], atık seramik tozu ve kireç [14], kalsit tozu [15], bakır cürufu [16], çelik cürufu [17], kumtaşı bulamaç atığı [18], pirinç kabuğu külü ve kireç çamuru [19], kauçuk lastik tozu ve kireç [20], kireç ve zeolit [21], kireç ve perlit [22] kullanılmıştır. Bütün bu çalışmalarda ilk adım kilin mühendislik özelliklerini iyileştirecek uygun katkı miktarının belirlenmesi, ikinci adım bu belirlenen katkı oranları için sertleşme ve mukavemet ilişkilerinin anlaşılması amacıyla zamana bağlı küre bırakılması, kür süresi sonunda serbest basınç deneylerinin ve mikro yapısal deneylerin yapılmasıdır.

Bilinen en eski zemin stabilizasyon malzemelerinden biri kireçtir. Zemine kireç karıştırıldığında, daneler arasında reaksiyonlar oluşur. Kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminlerde bu reaksiyonların sonucu olarak kireç iyi bir iyileştirme sağlar. Zeminlerin kireç ile etkileşime girme noktasının normalde kütlece %1 ile %3 arasında değiştiği, birçok zeminde kil içeriği %80 ile sınırlı olduğundan optimum kireç içeriğini %8'in altında tutmanın oldukça faydalı olacağı belirtilmiştir. Genel olarak nispeten düşük kireç içeriği yalnızca zeminin değişmesine neden olurken, daha yüksek kireç içeriğinde hem modifikasyon hem de katılaşmanın mümkün olduğu belirtilmiştir [23]. Optimum kireç içeriğinin zeminin kütlece göre %2-%8 aralığında değiştiği literatür çalışmalarında görülmektedir [5]. Kil zemin stabilizasyonunda kireç oranı sabit tutularak diğer katkıların ilave edildiği çalışmalar mevcuttur. Kireç oranı %8 'de sabit tutularak farklı zeolit oranları [21], farklı perlit oranları [22] ve %6 'da sabit tutularak farklı uçucu kül oranları [24] ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, kireç oranı %6 'da sabit tutularak Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külü ve Bitlis volkanik tuffünün yüksek plastisiteli kile olan etkileri araştırılmıştır.

Afşin-Elbistan termik santralinde linyit kömürü yakılmaktadır. Kömürün yakılması sonucunda ortaya çıkan gazlar (içinde katı

parçacıklar da bulunmaktadır) bacadan yukarı doğru ilerler. Bacadan çıkan gazların içindeki katı parçacıkların atmosfere geçişine engel olmak için filtreler yerleştirilir. Filtreler, katı parçacıkların atmosfere geçmesine engel olur. Bacalarda ve filtrelerde biriken camsı katı tabakaya uçucu kül adı verilmektedir [25]. Uçucu küller yapay puzolan malzemesidir. Volkanik tüfler, yanardağların püskürttüğü kül, kum ve lav parçacıklarının katılaşmasıyla oluşur. Bu oluşumlar çoğunlukla açık renkli, hafif, gözenekli kayaç özellikleri taşıyan, bazen tabakalı veya tabakasız yapıdadır [26]. Volkanik dağların yamaç ve eteklerinde bulunan, riyolit tüfü veya bazalt tüfü şeklinde isimlendirilen volkanik küllerin kaynaşmış bir halidir. Soğuma sırasında tuf külesindeki gazların havaya karışması sırasında içte ya da yüzeyde gözeneklerin oluştuğu düşünülmektedir. Volkanik tüfler doğal puzolan malzemesidir ve inşaat sektöründe birçok uygulama alanı bulunmaktadır.

Bu çalışmada, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ağırlık oranlarında Afşin-Elbistan termik santraline ait uçucu kül ve %5, %10, %15, %20 ve %25 ağırlık oranlarında Bitlis volkanik tüfü yüksek plastisiteli kile ayrı ayrı karıştırılmıştır. Daha sonra kireç oranı %6 'da sabit tutularak uçucu kül ve volkanik tuf deneyleri aynı oranlar için tekrarlanmıştır. En yüksek serbest basınç mukavemetinin sağlandığı katkı oranları için 7, 14, 21, 90 ve 120 gün küre bırakılmış numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Literatürdeki stabilizasyonla ilgili çalışmalarda genellikle 28 güne kadar kür uygulanmıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak 90 ve 120 günlük uzun süreli kür etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

### 2.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Çalışmada Eşen barajları (Muğla - Fethiye ) civarından yüzeyden 1-2 m derinlikten alınan kil numunesi, kilin stabilizasyonu için Afşin-Elbistan termik santralinden temin edilen uçucu kül ve Bitlis volkanik tüfü kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında kil zemin stabilizasyonunda uçucu kül ve volkanik tüfe ilave olarak %6 ağırlık oranında kireç (Öztüre Madencilik'ten temin edildi) ilave edilmiştir.

Kil numune ve katkılar üzerinde ASTM D854 [27] standardına uygun olarak dane birim hacim ağırlık deneyleri, ASTM D1140 [28] ve ASTM D422 [29] standartlarında elek ve hidrometre analizleri, ASTM D4318 [30] standardında kıvam limitleri deneyleri, ASTM D698 [31] standardına uygun olarak standart kompaksiyon deneyleri ve ASTM D2166 [32] standardında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kilin ve kullanılan katkı numunelerinin kimyasal analizleri ve X-ray difraksiyon analizleri yapılmıştır. Kimyasal analizden elde edilen sonuçlar Tablo 1 'de, X-Ray analiz sonuçlarından elde edilen mineral içerikleri Tablo 2 'de görülmektedir.

Kil üzerinde yapılan elek analizi ve hidrometre deneylerinden numunenin dane boyutu yüzdeleri; kum=%2, silt=%38 ve kil=%60 olarak bulunmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zemin sınıfı Yüksek Plastisiteli Kil (CH) olarak belirlenmiştir [33]. Kil zemin ve katkı numuneleri üzerinde yapılan kıvam limitleri, standart kompaksiyon, dane birim hacim ağırlık ve standart kompaksiyon deney şartlarında sıkıştırılarak yapılan serbest basınç mukavemeti sonuçları bir bütün halinde Tablo 3 'de verilmiştir. Uçucu kül ve volkanik tüfte plastisite özelliği olmadığı, volkanik tuffün maksimum kuru birim hacim ağırlığının kil ve uçucu küle göre oldukça yüksek, optimum su içeriğinin ise düşük olduğu görülmektedir. Volkanik tuffün dane birim hacim ağırlığı ve serbest basınç mukavemeti de kil ve uçucu küle göre daha azdır.

**Tablo 1.** Kil ve katkı malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Chemical analysis results of clay and additives)

Oksitler	Kil (% Ağırlık)	Uçucu Kül (% Ağırlık)	Volkanik Tüf (% Ağırlık)	Kireç (% Ağırlık)
Na <sub>2</sub> O	<0,1	0,03	5,05	<0,1
MgO	17,4	1,38	0,13	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	12,79	13,07	<0,1
SiO <sub>2</sub>	47,1	31,25	68,17	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,1	0,21	0,09	<0,1
K <sub>2</sub> O	0,3	0,57	4,71	<0,1
CaO	2,8	41,73	0,67	79,3
TiO <sub>2</sub>	0,2	0,23	0,28	<0,1
MnO	0,1	0,02	0,07	<0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,6	4,94	4,75	0,1
A.Za	9,85	5,72	1,56	19,89

**Tablo 2.** Kil ve katkı malzemelerinin mineral içeriği (Mineral content of clay and additives)

Numune	Mineraller
Kil	Simektit, serpantin, kuvars, kalsit, amorf silika, amfibol (çok az), feldispat (çok az), klor (çok az)
Uçucu kül	Analklin, Anhidrit, Kalsit ve Kuvars
Volkanik tüf	Anortoklaz, Microclime ve Albit
Kireç	Portlandit, Aragonit (az), kalsit (az), ilit (çok az)

**Tablo 3.** Kil ve katkı malzemelerinin mühendislik özellikleri [34] (Engineering properties of clay and additives)

Özellikler	Kil	Uçucu Kül	Volkanik Tüf
Likit limit W <sub>L</sub> (%)	108	-	-
Plastik limit W <sub>p</sub> (%)	38	-	-
Plastisite indisi PI(%)	70	-	-
Maksimum kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{k,maks}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1,16	1,13	1,50
Optimum su içeriği, $\omega_{opt}$ (%)	38	40	22
Dane birim hacim ağırlık, $\gamma_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,75	2,50
Serbest basınç mukavemeti, $q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1,96	1,85	1,23

## 2.2. Kile Katkılar Karıştırılarak Yapılan Deneyler (Experiments Conducted by Mixing Additives to Clay)

Bu çalışmada, uçucu kül, volkanik tüf ve kirecin kilin kıvam limitlerine, standart kompaksiyon parametrelerine, serbest basınç mukavemetine olan etkileri araştırılmıştır. Araştırma süreci üç aşamadan oluşturulmuştur. Birinci aşamada uçucu kül ve volkanik tüfün kile olan etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. İkinci aşamada ise birinci aşamadaki katkı oranları sabit kalacak şekilde %6 oranında kireç ilave edilerek bütün deneyler tekrarlanmıştır. Kil zemin stabilizasyonu için; sıcaklık 20°C'den 50°C'ye yükseldiğinde kireç-zemin reaksiyonlarının ilerlemesinin altı kat daha hızlı olabileceği ve bu durumun serbest basınç mukavemetinde kayda değer bir artışa yol açabileceği belirtilmiştir [5]. Kireç-zemin reaksiyonları karıştırılmadan yaklaşık 1 saat sonra başlamaktadır, ıslak karıştırmadan sahada sıkıştırmaya kadar geçen sürenin artması, hedef yoğunluğa ulaşmak için sıkıştırma çabasını arttırmakta ve bu da inşaat maliyetinin artmasına yol açmaktadır [4]. Bu sebeplerle, katkı karıştırılarak yapılan bütün deneylerde deney ortamının ısısının 20°C'de olmasına ve numunelerin suyla homojen karışımı sağlandıktan sonra 1 saat içerisinde sıkıştırma aşamalarının bitirilmesine dikkat edilmiştir. Bütün deneylerde yukarıda verilen ASTM standartları uygulanmıştır.

Yüksek plastisiteli kile %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ağırlık oranlarında uçucu kül ve %5, %10, %15, %20 ve %25 volkanik tüf ilave edilerek kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve standart kompaksiyon şartlarında hazırlanan numunelerde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan standart kompaksiyon deney sonucundan bulunan kompaksiyon eğrileri Şekil 1'de verilmiştir. Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde uçucu kül katkılı kompaksiyon eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülürken, volkanik tüf katkılı kompaksiyon eğrilerinin birbirinden farklı olduğu

görülmektedir. Kile uçucu kül karıştırılması maksimum kuru birim hacim ağırlığı pek fazla etkilememiş, optimum su içeriğini ise biraz arttırmıştır. Volkanik tüf katkısı %20'ye kadar maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırmış, optimum su içeriğini azaltmıştır. %20'den sonra ise maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su içeriği ise artmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında %6 oranında kireç ilave edilerek deneyler tekrarlanmıştır. Şekil 2'de kireç ilaveli olarak yapılan standart kompaksiyon deney sonuçları görülmektedir. Uçucu kül ve kireç katkılı kompaksiyon eğrileri incelendiğinde optimum su içeriğinden sonra kompaksiyon eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu, optimum su içeriğinden önce eğrilerde fark olduğu görülmektedir. Volkanik tüf ve kireç katkılı kompaksiyon eğrileri ise birbirinden daha farklıdır. Kireç katkısının her iki katkı için de maksimum kuru birim hacim ağırlığı pek fazla değiştirmedeği, optimum su içeriğini azalttığı gözlenmiştir.

Standart kompaksiyon deneylerinden belirlenen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık şartları dikkate alınarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde ASTM D 2166 [32] standartları uygulanmıştır. Deneylerde No.40 elekten geçen numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler ikiye ayrılabilen bir silindire (38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde) tek seferde, maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su içeriğinde yerleştirilerek pres altında sıkıştırılmıştır. Numuneler silindire tabakalar halinde sıkıştırıldığında, numunenin silindirden çıkartılması sırasında numunede kopmalar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı numunelerin silindire tek seferde yerleştirilip sıkıştırılması tercih edilmiştir. Numuneler silindirin içine sıkıştırılırken su muhtevasının değişmemesine özen gösterilmiştir. Hazırlanan numunelerin, kompaksiyon kalıbına sıkıştırılan numunelerle aynı durumda sıkıştırılması için 5,956 bar basınçla sıkıştırılmıştır. Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan hidrolik sıkıştırıcı Şekil

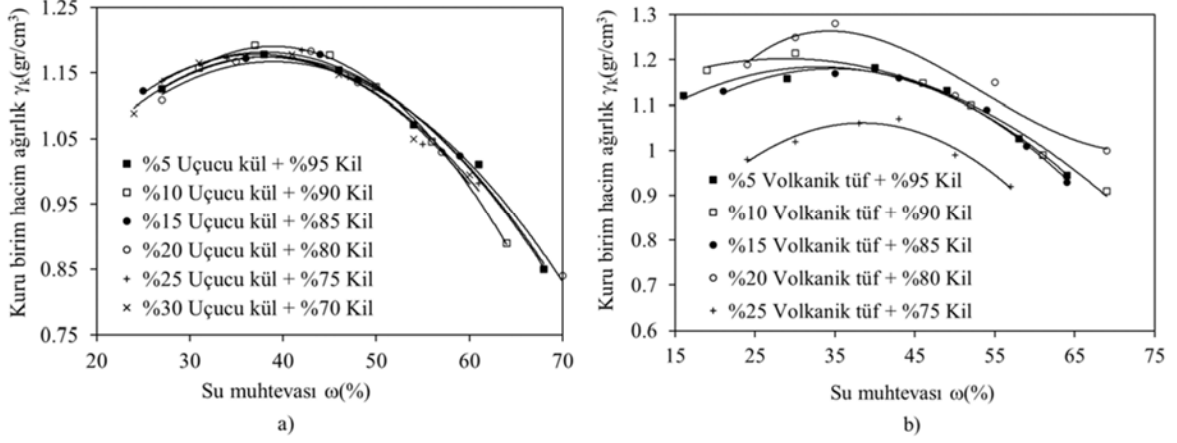
3a'da görülmektedir. Hazırlanan numunelerin Yükseklik/Çap oranı 2-2,5 arasındadır. Silindirden çıkarılan numunelerin ağırlık kontrolleri yapılmıştır (Şekil 3b), daha sonra bu numuneler serbest basınç aletine yerleştirilip 0,5 mm/dk. hızıyla yüklenmiştir (Şekil 3c).

Çalışmanın üçüncü kısmında serbest basınç mukavemetine kür etkisi incelenmiştir. Belirlenen ideal katkı oranları için hazırlanan numunelere 7, 14, 21, 90 ve 120 gün süresince kuru kür uygulanmıştır.

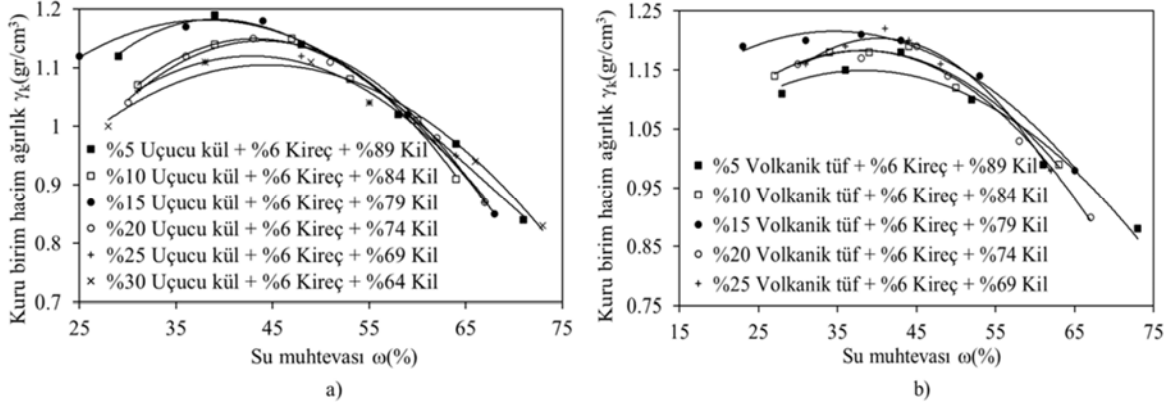
Kür süresi dolan numunelerin serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deneyler sonuçlar ve tartışmalar kısmında verilmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

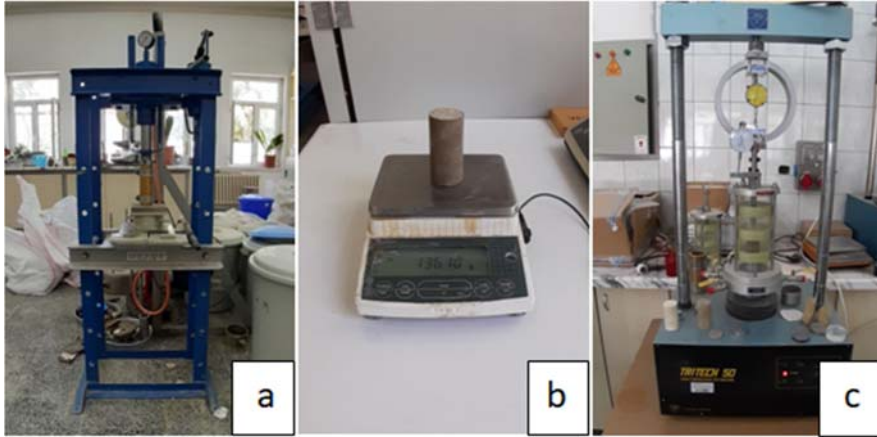
Yüksek plastisiteli Eşen kiline ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külü ve %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında Bitlis volkanik tüfü ilave edilerek



Şekil 1. Katkı karıştırılmış kilin kompaksiyon eğrileri (a) Afşin-Elbistan volkanik külü, (b) Bitlis volkanik tüfü [34] (Compaction curves of admixed clay (a) Afşin-Elbistan fly ash, (b) Bitlis volcanic tuff)



Şekil 2. %6 Kireç katkılı kompaksiyon eğrileri (a) Afşin-Elbistan uçucu külü, (b) Bitlis volkanik tüfü (Compaction curves with 6% lime addition (a) Afşin-Elbistan fly ash, (b) Bitlis volcanic tuff)



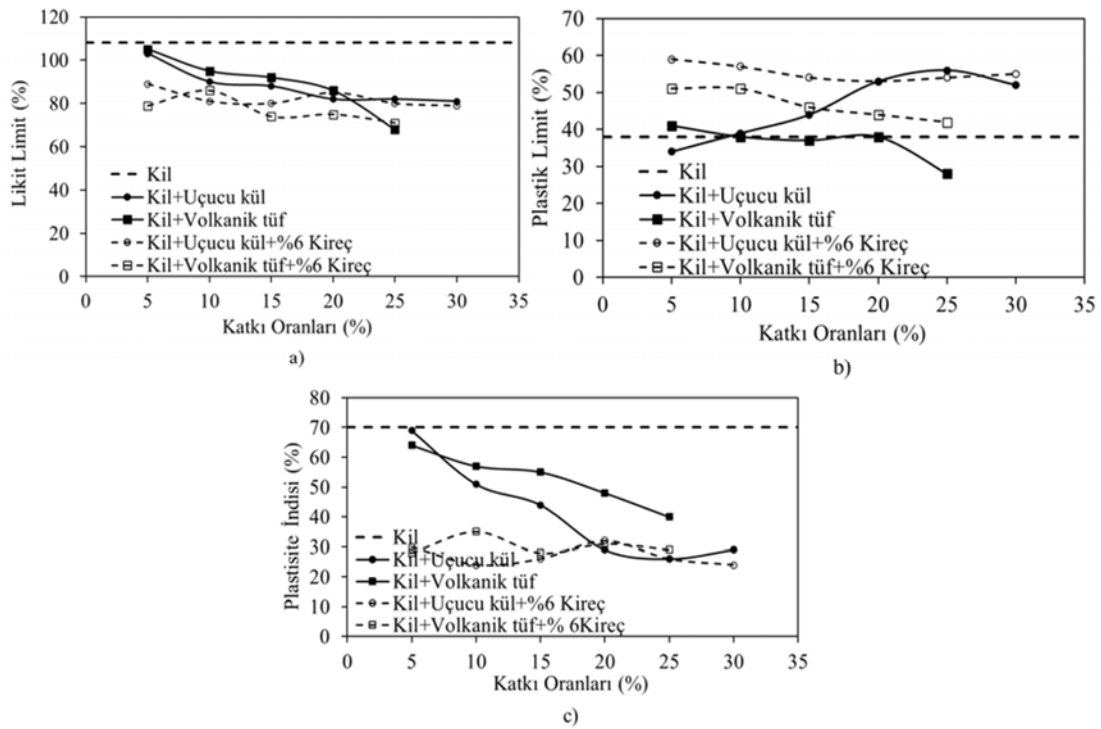
Şekil 3. Serbest basınç deneyi adımları [34] (Unconfined compressive test steps)

kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmı için kireç ağırlıkça %6 oranında sabitlenerek aynı deney serileri tekrar edilmiştir. Katkı malzemeleriyle kilin likit limitinin, plastik limitinin ve plastisite indisinin değişimi Şekil 4’de görülmektedir.

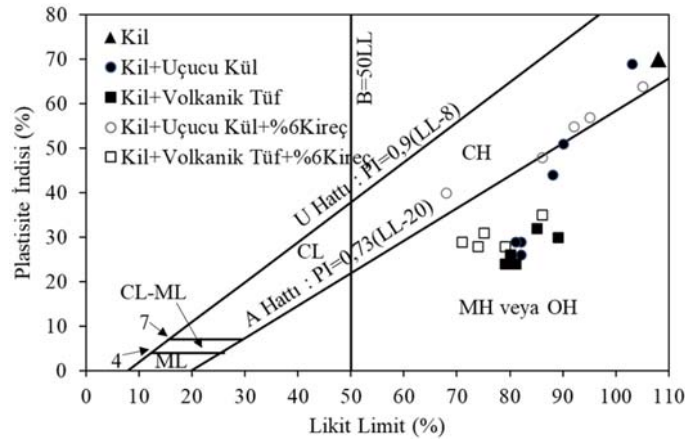
Kıvam limitleri deney sonuçlarına göre; uçucu kül ve volkanik tüf katkılarının ilavesi ile kilin likit limitinin azaldığı görülmektedir. Kile uçucu kül ve kireç ilave edildiğinde likit limitteki azalma sadece uçucu kül durumundan daha fazla olmuştur. Aynı durum volkanik tüf ve kireç ilavesinde de geçerlidir. Bell [2], montmorillonit mineralinin likit limitinin kireç ilave edildiğinde azaldığını belirtmiştir. Kireç ilavesinde likit limitin azalması, kilin diffuse layer tabakası kalınlığının azalması ve parçacık seviyesinde kayma direncindeki artış ile açıklanabilir [35]. Katkı ilave edilmesi kilin plastik limitini

arttırmıştır. Bu artış uçucu kül ve volkanik tüfe kireç ilave edildiğinde daha fazla olmuştur. Katkı ilave edilmesi kilin plastisite indisini azaltmıştır. Bu azalma uçucu kül ve volkanik tüfe kireç ilave edildiğinde daha fazladır. Kireç ilave edildiğinde kil zeminin plastik limitinde artış olduğu, bu artışın montmorillonit türü killerde daha fazla olduğu belirtilmiştir [36]. Kilin plastisitesi yükseldikçe kalsiyuma karşı hassasiyeti artar. Kile uçucu kül ilave edilmesi likit limiti azaltmaktadır [37]. Uçucu külün zemine karıştırılması zeminin tane yüzey alanını azaltarak suya olan ihtiyacın azalmasına ve bunun sonucunda zeminin plastisitesinde azalmaya neden olabilmektedir [5].

Kile karıştırılan katkıların etkisinin görülmesi amacıyla plastisite kartına deney sonuçları işaretlenerek Şekil 5’de verilmiştir. Likit limiti %108, plastisite indisi %70 olan CH sınıfındaki kil zeminin katkıların etkisiyle değişimi plastisite kartında daha net



Şekil 4. Farklı katkı oranlarıyla (a) likit limitin (b) plastik limitin ve (c) plastisite indisinin değişimi (Change of (a) liquid limit (b) plastic limit and (c) plasticity index with different additive ratios),

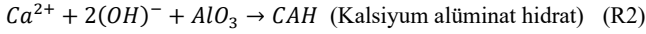
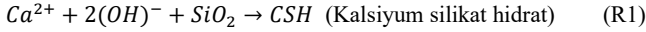


Şekil 5. Kile uçucu kül, volkanik tüf ve kireç karıştırılarak oluşturulan karışımların plastisite kartındaki durumu (The status of mixtures created by mixing clay with fly ash, volcanic tuff and lime on the plasticity card)

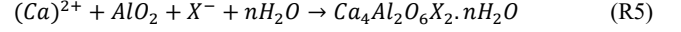
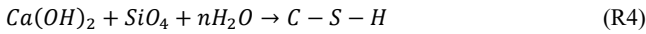
görülmektedir. Katkı malzemesi ilavesinin karışımın zemin sınıfını değiştirecek kadar etkili olduğu, birçok durumda A hattının alt kısmına düştüğü görülmektedir. Uçucu kül kendi başına plastik olmasa da karıştırıldığı zeminin limit , plastik limit ve plastisite indisi değerlerini karışım olarak yükseltir. Bununla birlikte, bazı araştırma sonuçları uçucu külün tek başına uygulanmasının yüksek derecede plastik zeminlerin özelliklerini geliştirmek için yetersiz olabileceğini göstermektedir. Uçucu kül ile stabilize edilmiş doğal zeminler yeterli kür süresine, su içeriğine, ince dane yüzey alanına, silika, alümina ve demir oksit miktarına bağlı olarak puzolanik aktivite gösterir [12].

Kile katkı malzemeleri ilavesiyle serbest basınç mukavemetinin ( $q_u$ ) değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Bütün katkı çeşitleri ve oranları için serbest basınç mukavemetinin arttığı grafikten anlaşılmaktadır. Kil zemine stabilizasyon malzemeleri eklendiğinde koloidal ve puzolanik olmak üzere iki tip kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu kimyasal reaksiyonlar, zemine katkı malzemelerinin karıştırılmasından hemen sonra veya daha uzun bir süre sonra oluşabilir. Koloidal ve puzolanik reaksiyonlardan farklı olarak oluşan karbonasyon, stabilizasyon sürecini olumsuz yönde etkileyen istenmeyen bir reaksiyondur. Karbonasyon reaksiyonunda kireç karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum alüminat hidrat (CAH) gibi önemli çimentolu malzemeler yerine kalsiyum karbonatın oluşmasına neden olur [38]. CSH ve CAH, kil parçacıklarını güçlü bir şekilde bağlar ve bu sayede kayma mukavemetlerinde, stabilitelelerinde ve taşıma kapasitelerinde uzun vadeli bir iyileşme meydana gelir [4, 5].

Uçucu külden salınan kalsiyumun kilden ve uçucu külden salınan alümina ve silikat ile CSH ve CAH çimento jelleri oluşturmak için reaksiyona girdiği belirtilmiştir (R1, R2). Bu jeller numunenin çevresinde çimento çerçeve oluşturarak suyu emme eğilimini azaltır [39].



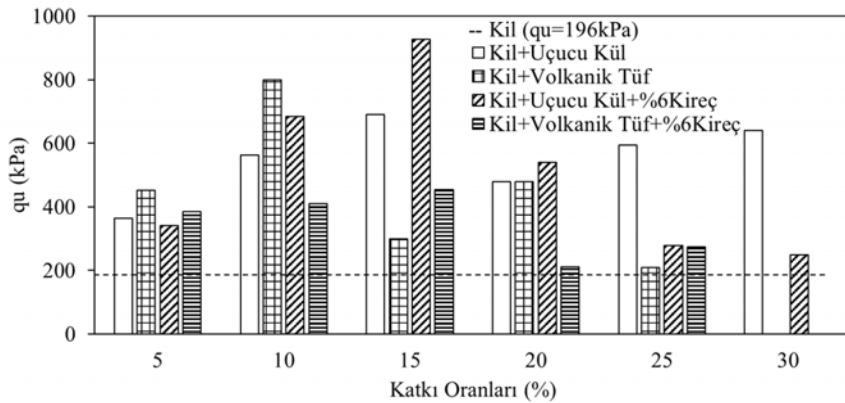
Hidrasyon reaksiyonu adsorbe su tabakasının kalınlığını önemli ölçüde azaltır. Bundan dolayı su ilavesine karşı duyarlılık azalmış olur. Sonra puzolanik reaksiyon oluşur. Kildeki silika, alümina ve portlandit mineralleri, zemin danelerini daha fazla birbirine bağlamak için CSH jeli oluşturacak şekilde reaksiyona girer [17, 40] (R3-R5).



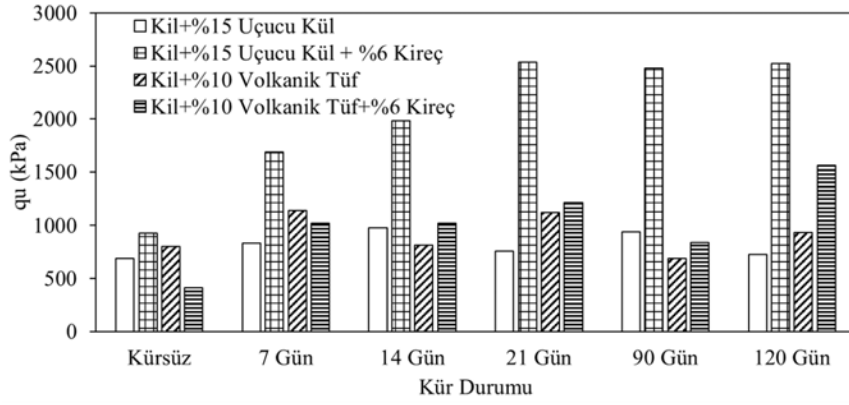
Kimyasal stabilizasyonda, katkı malzemeleriyle zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sürecinde üç önemli aşama vardır: Kurutma, modifikasyon ve stabilizasyon. Birinci aşamada, su ile katkı maddeleri arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon nedeniyle killi zeminin su muhtevası hızla düşer. İkinci aşamada, plastisite özellikleri azalır. Bunun sonucu olarak killi zemine kireç ilave edilmesi, optimum su içeriğini artırırken maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalır. Zemindeki bu değişiklikler kireç ilavesinden sonra kısa sürede gerçekleşir. Üçüncü aşama, killi zeminin özellikleri üzerinde uzun vadeli bir etki oluşturmaktır. Uzun süreli dayanıklılık, plastisitede ve büzülmede tutarlı azalma, çözülmeye ve uzun süreli ıslatmaya karşı direnç bu etkiler arasında sayılabilir [41]. Genellikle uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte zeminin kuru birim hacim ağırlığı artarken optimum su içeriği azalır. Kuru yoğunluktaki artış, sıkıştırma sırasında parçacıklar arası daha büyük boşlukların daha ince uçucu kül ile doldurulması ile ilişkilendirilebilirken, optimum su içeriğindeki azalma, tanelerin spesifik yüzey alanı arttıkça ince parçacıklar tarafından artan su tüketimine atfedilir. Uçucu kül miktarındaki artışla birlikte zeminlerin plastisitesi önemli ölçüde azalmaktadır [5].

Kimyasal stabilizasyondaki üçüncü aşamanın deneysel olarak belirlenebilmesi için kür uygulanmış deneyler yapılmaktadır. Bu çalışmada da seri halinde yapılan deneylerin sonuçları incelenip serbest basınç mukavemeti bakımından optimum oranlar Şekil 6'dan yararlanılarak belirlenmiştir. Bu oranlar %15 Uçucu Kül+%85 Kil, %15 Uçucu Kül+%6 Kireç+%79 Kil, %10 Volkanik Tüf+%90 Kil ve %10 Volkanik Tüf+%6 Kireç+%84 Kil şeklinde sıralanabilir. Bu oranlarda hazırlanan serbest basınç numuneleri kuru küre (7, 14, 21, 90 ve 120 gün) bırakılmıştır. Her oran için iki serbest basınç deney numunesi hazırlanmıştır. Yeteri kadar kuru kürede bekletilen numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kuru küre bırakılan numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde, 7 günlük kür sonunda bütün numunelerde serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. 14 günlük kür sonunda uçucu kül katkılı numunelerde artış olurken volkanik tüf katkılı numunede 7. güne göre azalma meydana gelmiştir. 21 günlük kür sonunda yine bütün numunelerde 14 günlük küre göre artış olmuştur. 90 günlük kür sonunda 21. güne göre sadece %15 uçucu kül katkılı numunede artış olurken diğer üç numunede 14 güne göre bir miktar azalma olmuştur. 120. gün sonunda ise 90 güne göre sadece %15 uçucu kül katkılı numunede azalma olurken diğer numunelerde artış gözlenmiştir. %10 volkanik tüf+%6 kireç katkılı kil numunenin 90 günlük kür durumunda serbest basınç mukavemetinin 21 günlük



Şekil 6. Serbest basınç mukavemetinin farklı katkı oranlarıyla değişimi  
(Change of unconfined compressive strength with different additive ratios)



Şekil 7. Serbest basınç mukavemetinin kür süreleriyle değişimi (Change of unconfined compressive strength with curing times)

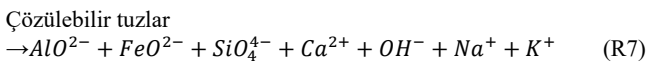
ve 120 günlük kür durumundaki serbest basınç mukavemetinden az olduğu görülmüştür. Çalışmada doğal kil kullanılmıştır. Kil alındığı bölgeden laboratuvara getirildiğinde çeyrekleme yöntemiyle karıştırılmıştır. Bu kilden No.40 elek altına elenmiş numuneler hazırlanmıştır. Katkı malzemeleri de No.40 elekten elenmiştir. Karışım numuneleri hazırlanırken bu numuneler kullanılmıştır. Bu durumun doğal malzeme kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada her karışımdan iki numune hazırlanmıştır. İleriki çalışmalarda kür numuneleri hazırlanırken daha fazla numune hazırlanmasına dikkat edilmesi önerilmektedir.

Küre bırakılarak yapılan deney sonuçları incelendiğinde, Afşin-Elbistan uçucu külü katkısında 14 gün kür süresinde, Afşin-Elbistan uçucu külü kireç ile kullanıldığında 90 gün kür süresinde, Bitlis volkanik tüfü katkısında 7 gün kür süresinde, Bitlis volkanik tüfü kireç ile kullanıldığında 120 gün kür süresinde en yüksek serbest basınç mukavemeti elde edilmiştir. Afşin-Elbistan uçucu külü kireç ile kullanıldığında, kireç kullanılmayan deneylere göre daha iyi bir iyileşme sağlamıştır. Bitlis volkanik tüfü ile yapılan kürlü serbest basınç deneylerine bakıldığında kireç ilavesinin ilk günlerde serbest basınç mukavemetinde daha iyi bir iyileşme yapmadığı, 14 gün kür süresine gelindiğinde Bitlis volkanik tüfünde kireç ilavesinin etkisini gösterdiği ve daha iyi bir iyileşme yapmaya başladığı görülmektedir. Bunun sebebinin ağırlıkça %6 kireç ilavesinin reaksiyonu başlatmak için gerekli olan eşik değerinin altında olabileceği, optimum su içeriğinin kireç reaksiyonları için yetersiz kalmış olabileceği ve Bitlis volkanik tüfünün bünyesindeki CaO miktarının az olmasından dolayı reaksiyonların geç başlaması gibi sebepler düşünülmektedir.

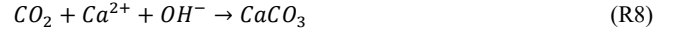
Chen vd. [19], Metakaolin'e (MK) RHA (pirinç kabuğu külü) ve CS (Karbit cürüfu) ilave ederek kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, kimyasal ve sızıntı toksisitesi deneyleri uygulamışlardır. Farklı sürelerde kür uyguladıkları numunelerin kür öncesi ve kür sonrası mikroanalizlerini yaparak aşağıdaki gibi kimyasal formülleri vermişlerdir (R6). Sıkıştırma etkisini geliştirmek için CS 'deki CaO gözenek suyunda hızla çözülebilir ve büyük miktarda  $Ca^{2+}$  ve  $OH^-$  üretebilir.



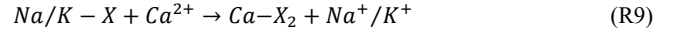
Aynı zamanda kildeki çözünebilir tuzlar kuvvetli alkalın ortamda çok sayıda aktif iyon üretmek için hidrolize edilebilir (R7).



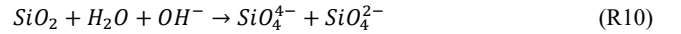
Daha sonra, kürlenme yaşının artmasıyla birlikte, gözenek sıvısındaki  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  ve havadaki  $CO_2$ , karbonatlama reaksiyonu yoluyla oluşan yoğun  $CaCO_3$  kristallerine reaksiyona girebilir (R8).



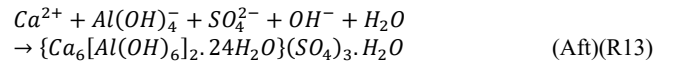
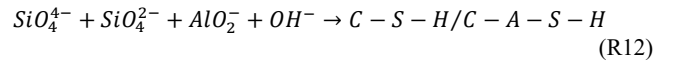
İyon değiştirme reaksiyonları da aynı anda meydana gelir ve bu da zemin parçacıkları arasındaki etkileşim kuvvetini azaltır (R9).



Daha sonra CS tarafından oluşturulan kuvvetli alkali ortamda, RHA ve MK'den gelen  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  bileşenleri puzolanik reaksiyon yoluyla  $SiO_4^{4-}$ ,  $SiO_4^{2-}$  ve  $AlO_2^-$  gibi aktif iyonlar oluşturacak şekilde aktive edilebilir (R10, R11).



Bu aktif iyonlar C-S-H/C-A-S-H ve Aft gibi çimentolu hidratlar üretmek için karmaşık kimyasal reaksiyonlara girebilir (R12, R13).



Literatürde kür uygulanmış serbest basınç mukavemeti değerleri incelendiğinde, kür öncesi ve kür sonrası mikro analizlerin önemli olduğu ancak her çalışmada yapılamadığı görülmüştür. Katkı malzemeleri kullanılarak yapılan stabilizasyonda bu analizlerin olmaması mühendislik davranışının açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Mikro analiz yapılmış çalışmalar kendi arasında incelendiğinde her çalışmada dayanımı etkileyen mineral yapısının tam görüntülenemediği, daha detaylı analizlere ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Kil zemine ilave edilen kireç içeriği yüksek olduğunda ve numune optimum su içeriğinde hazırlanıp daha fazla su eklenmeden kürlendiğinde, su içeriğinin kirecin tam hidrolizi için yetersiz kalabileceği belirtilmiştir. Suyun az olması durumunda, tüm kireç taneleri mukavemet kazanımına katkıda bulunmadan, tüm kür süresi boyunca olduğu gibi kalabilir. Kireç zemine göre nispeten daha düşük kohezyon ve sürtünme gösterdiğinden reaksiyona girmemiş halde bulunması zeminin mukavemetini olumsuz etkiler [42]. Uçucu küldeki yüksek silika ve alümina içeriğinin, puzolanik aktiviteyi 180 güne kadar uzatabileceği [43], uçucu kül ile karıştırılmış kilin serbest basınç mukavemetinde doğrusal olmayan bir artış olduğu [44], uçucu kül katkılı zeminlerin 28 gün kür sonunda taşıma gücünde %4 ile %160 oranında artış olduğu [45] belirtilmiştir.



#### 4. Simgeler (Symbols)

ASTM : American Society for Testing and Materials  
A.Za : Ateş ziyatı  
UCS : Unconfined compression strength

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Yüksek plastisiteli kil zeminin kimyasal stabilizasyonunun yapıldığı bu çalışma üç aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külü ve Bitlis volkanik tüfü ayrı ayrı karıştırılmış, ikinci aşamada %6 optimum kireç miktarı bu karışımlara ilave edilmiştir. Üçüncü aşamada ise serbest basınç mukavemetine kür etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Kile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül ve %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında volkanik tuf ilave edilmesi kilin likit limitini ve plastisite indisini azaltmış, plastik limiti arttırmıştır. Bu katkılar kireç ilavesi ile kullanıldığında likit limit ve plastisite indisindeki azalma ve plastik limitteki artma daha fazla olmuştur. Kilin likit limiti %108 iken %25 volkanik tuf+%6 kireç karıştırılmış numunede %71 'e düşmüştür. Likit limitteki en fazla azalma (%52) bu karışımda elde edilmiştir. Kilin plastisite indisi %70 iken yine bu numunede plastisite indisi %29 olarak elde edilmiştir.

Uçucu kül katkısı maksimum kuru birim hacim ağırlığı pek fazla etkilememiş, optimum su içeriğini bir miktar arttırmıştır. Volkanik tuf katkısı %20 'ye kadar maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırmış, optimum su içeriğini azaltmıştır. %20 'den sonra ise maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmış, optimum su içeriği artmıştır. Kireç katkısının her iki katkı için de maksimum kuru birim hacim ağırlığı pek fazla değiştirmedigi, optimum su içeriğini ise arttırdığı görülmüştür. Her iki katkı için aynı oranlar karşılaştırılacak olursa: %15 uçucu kül katkılı kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,185 gr/cm<sup>3</sup>, optimum su içeriği %38; %15 uçucu kül+%6 kireçle karıştırılmış kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,15 gr/cm<sup>3</sup>, optimum su içeriği %40 iken %15 volkanik tuf katkılı kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,18 gr/cm<sup>3</sup>, optimum su içeriği %36; %15 volkanik tuf+%6 kireçle karıştırılmış kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,21 gr/cm<sup>3</sup>, optimum su içeriği %40 olarak belirlenmiştir. Katkısız haldeki doğal kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,16 gr/cm<sup>3</sup>, optimum su içeriği %38'dir. Bu beş deney sonucu karşılaştırıldığında katkılarının daha iyi bir sıkıştırma sağladığı, benzer durumun bütün karışım oranlarında elde edildiği görülmüştür.

Uçucu kül ve volkanik tuf katkısı kilin serbest basınç mukavemetini arttırmıştır. Optimum uçucu kül oranı %15, optimum volkanik tuf oranı %10 olarak belirlenmiştir. Bu katkılar kireç ilavesi ile kullanıldığında serbest basınç mukavemetindeki artış daha fazla olmuştur. Serbest basınç mukavemetinin artırılmasında en etkili olan katkı çeşidi %15 uçucu kül+%6 kireç karışımı olarak belirlenmiştir. Kilin serbest basınç mukavemetiyle karşılaştırıldığında katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinde %373 artış olduğu görülmüştür.

%15 uçucu kül katkılı kil, %10 volkanik tuf katkılı kil ve bunların kireç ilaveli durumundaki numunelere 7, 14,21, 90 ve 120 gün kuru kür uygulandığında serbest basınç mukavemetinin kürsüz durumdakilerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Genel olarak kür süresi arttığında serbest basınç mukavemetinde kürsüz duruma göre artış gözlenmiştir. Kürsüz duruma göre kıyaslandığında serbest basınç mukavemetindeki ortalama artışlar sırasıyla; 7 gün kürde %73,5, 14 gün kürde %76,2, 21 gün kürde %92,67, 90 gün kürde %73,5, 120 gün kürde ise %118,56'dır. 90 gün kürdeki serbest basınç mukavemetindeki ortalama artışın az olma sebebi %10 volkanik tuf

katkılı numunede 90 gün kürde kürsüz durumdan daha düşük serbest basınç mukavemeti elde edilmiş olmasıdır. Farklı kür süreleri kendi içinde değerlendirildiğinde 7 günlük kür süresinin dayanım artışında çok etkili olduğu görülmektedir. En yüksek serbest basınç mukavemeti 120 gün kür durumunda %15 uçucu kül+%6 kireç karışımında elde edilmiştir.

Uçucu kül ve volkanik tufün ayrı ayrı veya optimum kireç oranıyla birlikte yüksek plastisiteli kilin serbest basınç mukavemetinin artırılmasında kullanılabileceği görülmüştür. Atık malzemelerin kil stabilizasyonu ile ilgili çalışmalarda kullanılması doğaya da katkı sağlayacaktır.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Süleyman Demirel Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi, FYL-2020-7401 no'lu projeye destekte bulunmuştur. Yazarlar destekleri için teşekkür eder.

#### Kaynaklar (References)

1. Hemanth, T.R.S.S., Sharma, V., Strength and compaction behavior of copper slag stabilized soil, *Materials Today: Proceedings*, 93 (3), 505-509, 2023.
2. Bell, F., *Engineering Treatment of Soils*, CRC Press, 1993.
3. Abduljawad, S.N., Treatment of calcareous expansive clays. In: Fly ash for Soil Improvement. ASCE Geotechnical Special Publication, 36, 100-115, 1993.
4. Petry, T.M., Little, D.N., Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures: history, practice, and future. *J. Mater. Civ. Eng.* 14 (6), 447-460, 2002.
5. Barman, D., Dash, S.K., Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14, 1319-1342, 2022.
6. Janani, V., Ravichandran, P.T., Effect of calcined clay on the improvement of compaction, swell and microstructural characteristics of expansive soil, *Heliyon* 9, 19337, 2023.
7. Noaman, M.F., Khan, M.A., Ali, K., Jamal, A., Effect of fly ash on the shear strength of clay soil, *Materials Today: Proceedings*, 16 February 2023.
8. Zimar, Z., Robert, D., Zhou, A., Giustozzi, F., Setunge, S., Kodikara, J., Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review, *Journal of Environmental Management*, 312, 114926, 2022.
9. Zeynali, Y., Niroumand, H., Moayed, R.Z., Stabilizing cohesive soils with Micro- and Nano- fly ash as Eco-friendly Materials: An experimental study, *Construction and Building Materials*, 399, 132490, 2023.
10. Depack, M.S., Rohini, S., Harini, B.S., Beulah Gnana Ananthi, G., Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil, *Materials Today: Proceedings*, 37, 2014-2018, 2021.
11. Coşkun E.B., Teymür B., The potential reuse of Marmara Sea dredged material in road construction, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 219-234, 2022.
12. 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, 132590, 2023.
13. Jassim, N.W., Hassan, H.A., Mohammed, H.A., Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer, *Results in Engineering*, 14, 100436, 2022.
14. Beyene, A., Tesfaye, Y., Tsige, D., Sorsa, A., Wedajo, T., Experimental study on potential suitability of natural lime and waste ceramic dust in modifying properties of highly plastic clay, *Heliyon*, 8, 10993, 2022.
15. Prongmanee, N., Horpibulsuk, S., Dulyasucharit, R., Noulmance, A., Boueroy, P., Chancharonpong, C., Novel and simplified method of producing microbial calcite powder for clayey soil stabilization, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 35, 100480, 2023.
16. Hemanth, T.R.S.S., Sharma, V., Strength and compaction behavior of copper slag stabilized soil, *Materials Today: Proceedings*, 93 (3), 505-509, 2023.
17. Cikmit, A.A., Tsuchida, T., Kang, G., Hashimoto, R., Honda, H., Particle-size effect of basic oxygen furnace steel slag in stabilization of dredged marine clay, *Soils and Foundations*, 59, 1385-1398, 2019.

18. Shekhawat, A.S., Tiwari, S.K., Rathore, P., Effect of sandstone slurry waste on the geotechnical properties of clay subgrade, *Materials Today: Proceedings*, 21 July 2023.
19. Chen, R., Cai, G., Dong, X., Pu, S., Dai, X., Duan, W., Green utilization of modified biomass by-product rice husk ash: A novel eco-friendly binder for stabilizing waste clay as road material, *Journal of Cleaner Production*, 376, 134303, 2022.
20. Kumar, M., Clay soil stabilization by utilizing secondary lime and rubber tire powder, *Materials Today: Proceedings*, 37, 3471–3474, 2021.
21. Khajeh, A., Chenari, R.J., Payan, M., MolaAbasi, H., Assessing the effect of lime-zeolite on geotechnical properties and microstructure of reconstituted clay used as a subgrade soil, *Physics and Chemistry of the Earth*, 132, 103501, 2023.
22. Şadoğlu E., Çalik Ü., Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35 (2) 551-561, 2020.
23. Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.D.F., Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes, *Geotechnique* 50 (6), 533-543, 2001.
24. Çimen, Ö., Keleş, E., Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1 (2), 80-90, 2020.
25. Öksüz, K., Afşin – Elbistan Termik Santral Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, Adana, 2006.
26. Helvacı, C., Alaca, O., Bigadiç borat yatakları ve çevresinin jeolojisi ve mineralojisi. *MTA Dergisi*, 113, 61-92, 1991.
27. ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania, 2010.
28. ASTM D1140, Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, West Conshohocken, PA, 2017.
29. ASTM D422, Standard Test Method for Particle- Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D., 2014.
30. ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania, 2010.
31. ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania, 2007.
32. ASTM D2166/D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, West Conshohocken, PA, 2016.
33. Kalay, E., Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Sstabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, 54, Isparta, 2010.
34. Keleş, E., Bitlis pomzası, Bitlis Volkanik Tüfü, Afşin- Elbistan Uçucu Külü ve Kirecin Yüksek Plastisiteli Kile Olan Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, 124, Isparta, 2020.
35. Lambe, T.W., Soil Stabilization, In: A Leonards, G. (Ed.) *Foundation Engineering*, McGraw Hill Book Co., 1962.
36. Hilt, G.H., Davidson, D.T., Lime fixation on clayey soils, *Highw. Res. Board Bull*, 262, 20-32. 1960.
37. Binal, A., The effects of high alkaline fly ash on strength behaviour of a cohesive soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, 4, 1-11, 2016.
38. Gissele, S.R., Effect of lime on the mechanical response of a soil for use in unpaved forest roads, *Acta Sci. Technol.*, 42, 2020.
39. Sharma, N.K., Swain, S.K., Sahoo, U.C., Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotech. Geol. Eng.* 30, 1197–1205, 2012.
40. Toda, K., Sato, H., Weerakoon, N., Otake, T., Nishimura, S., Sato, T., Key factors affecting strength development of steel slag-dredged soil mixtures. *Minerals* 8, 174, 2018.
41. Subhashree, S., *Geo-Engineering Properties of Lime Treated Plastic Soils*, Thesis, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela-769008, Orissa, India, 2014.
42. Deka, S., Dash, S.K., Sreedeeep, S., Strength of lime-treated fly ash using bentonite. *Geotech. Eng.*, 46, 73-81, 2015.
43. Sivapullaiah, P.V., Prashanth, J.P., Sridharan, A., Effect of delay between mixing and compaction on strength and compaction parameters of fly ash, *Geotech. Eng. Bull.*, 7 (4), 277-285, 1998.
44. Kang, G., Tsuchida, T., Athapaththu, A.M.R.G., Strength mobilization of cement-treated dredged clay during the early stages of curing, *Soils and Foundations*, 55 (2), 375-392, 2015.
45. Fırat S., Cömert A., Curing time effects on CBR of stabilized kaoline with fly ash, lime and cement, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (4), 720-730, 2011.