



## VOLKANİK TÜF VE AMORF SİLİKANIN KİLİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ömür ÇİMEN<sup>1\*</sup>, Fatih Şerif COŞAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Çanakkale, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Zemin iyileştirme,  
Kil,  
Volkanik tüf,  
Amorf silika.

### Öz

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kile, volkanik tüf ve amorf silika ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılmış ve bu karışım numunelerinin mühendislik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Daha sonra kile %5 oranında kireç ilave edilerek volkanik tüf ve amorf silika katkılı deneyler tekrarlanmıştır. Çalışmada kıvam limitleri, standart kompaksiyon deneyleri yapıldıktan sonra optimum su muhtevalarında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri ve sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi yapılmış olan numuneler üzerinde SEM analizleri yürütülerek görüntüleri alınmıştır. Deneyler sonucunda; volkanik tüf katkısının kilin serbest basınç mukavemetini bir miktar arttırdığı, şişme basıncının önce azaldığı, daha sonra arttığı görülmüştür. Kireç ve volkanik tüf katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Kireç ve amorf silika katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Volkanik tüf ve amorf silika katkıları karşılaştırılırsa aynı orandaki amorf silika katkısının serbest basınç mukavemetinin artmasında daha etkili olurken, şişme basıncının azalmasında ise volkanik tüf daha etkili olmaktadır.

## EFFECT OF VOLCANIC TUFF AND AMORPHOUS SILICA ON THE ENGINEERING PROPERTIES OF CLAY

### Keywords

Soil improvement,  
Clay,  
Volcanic tuff,  
Amorphous silica.

### Abstract

In this study, volcanic tuff and amorphous silica in a certain ratios mixture with clay and engineering properties of mixed materials investigated. Then, lime was added at rate of 5% and experiments of added volcanic tuff and amorphous silica were repeated. After operating consistency limits and standard compaction tests, unconfined pressure tests and constant volume swelling tests were made on specimens prepared at optimum water content and maximum dry density. As a result of experiments, it was seen that the volcanic tuff addition increased a little to unconfined pressure, constant volume swelling pressure decreased before, then increased. SEM analyzes were carried out on the samples subjected to unconfined pressure test and images were taken. It was determined that the unconfined pressure more increased and constant volume swelling pressure more decreased in lime and volcanic tuff mixture samples. It was determined that unconfined pressure more increased and constant volume swelling pressure more decreased in lime and amorphous silica mixture samples. When the volcanic tuff and amorphous silica mixtures are compared in the same ratio amorphous silica more effective for increasing unconfined pressure, volcanic tuff more effective for decreasing swelling pressure.

### Alıntı / Cite

Çimen, Ö., Coşan, F.Ş., (2019). Volkanik Tüf ve Amorf Silikanın Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 459-466.

\* İlgili yazar / Corresponding author: omurcimem@sdu.edu.tr, +90-246-211-1202

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Ö. Çimen, 0000-0002-6138-6029	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	28.05.2018
F. Ş. Coşan, 0000-0001-8094-1967	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	16.01.2019
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	21.02.2019
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	15.09.2019

## 1. Giriş

Killi zeminlere oturan mühendislik yapılarını etkileyen en önemli özellik kilin şişme ve büzülmesidir. Şişme ve büzülme sonucunda oluşan deformasyonlar iyi projelendirilmemiş mühendislik yapılarında sürekli problemler oluşturmaktadır (Oweiss ve Bowman, 1981). Killerle ilgili literatür çalışmalarına bakıldığında ilk çalışmaların kilin mineralojik, kimyasal tanımlanması, farklı yapıdaki killerin sınıflandırılmaları, içyapısı ile ilgili çalışmalar ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar olduğu görülmektedir (Brigatti ve Creme, 1983).

Killerin ülkemizde Orta ve Güneydoğu Anadolu ile Batı Anadolu'nun bazı kesimlerinde geniş bir alana yayıldığı dikkate alındığında, hızlı artan kentleşme, yapılaşma, demiryolu, karayolu inşası gibi faktörler nedeniyle şişen killerin hacim değişiklikleri kontrol altına alınması gerekmektedir (Aydın, 2010). Killi zeminlerde şişmenin kontrol altına alınmasıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde killerin farklı malzemelerle karıştırılarak kullanıldığı uygulamalarla karşılaşılmaktadır. Uçucu kül, pomza, çimento, kireç, endüstriyel atıklar, polimerler gibi birçok malzemenin bu çalışmalarda kile karıştırıldığı görülmektedir. Bu malzemeler kile ayrı ayrı veya birkaç malzeme birlikte karıştırılarak kullanılmaktadır (Baykal ve Döven (1996) Tan ve İyisan (1996), Prabakar vd. (2004) İnan vd. (2005), Chauhan vd. (2008), Mohammed Ali (2012), As ve Çokça (2014), Ünver (2015)), Fındık (2005), Çimen vd. (2013)), Koliyas vd. (2005), Türköz vd. (2012), (Bhuvaneshwari vd., (2007) Bilgen vd. (2012), Taytak (2012)). Bu katkılarla yapılan zemin iyileştirme çalışmalarında genellikle farklı oranlarda malzemeler karıştırılarak mühendislik özelliklerinin değişimi incelenmekte, uygun karışım oranları, kür sürelerinin etkisi gibi konulara dikkat çekilmektedir.

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zemine amorf silika, volkanik tüf katkıları ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılarak zeminin mühendislik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Daha sonra %5 kireç oranı sabit tutulan kil numuneye aynı katkı oranlarında amorf silika ve volkanik tüf karıştırılarak mühendislik özelliklerinin değişimi tekrar değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Malzemelerin Tanıtılması

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kil zemine amorf silika, volkanik tüf ve kireç ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılarak zeminin mühendislik özelliklerinin değişimi

incelenmiştir. Kullanılan numunelerin görünüşleri Şekil 1 ve 2 'de, kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 1 'de görülmektedir.



Şekil 1. Kil ve kireç numunesinin görünüşü



Şekil 2. Amorf Silika ve Volkanik Tüf numunesinin görünüşü

Tablo 1. Numunelerin Kimyasal Analizleri

Oksitler	Kil	Kireç	Amorf Silika	Volkanik Tüf
Na <sub>2</sub> O	<0.1	<0.1	1.1	9.85
MgO	17.4	0.4	<0.1	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.3	<0.1	2.6	16.2
SiO <sub>2</sub>	47.1	0.1	92.5	46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.1	<0.1	<0.1	1.07
K <sub>2</sub> O	0.3	<0.1	0.04	2.36
CaO	2.8	79.3	0.31	8.34
TiO <sub>2</sub>	0.2	<0.1	1.34	2.05
MnO	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.6	0.1	0.1	8.38
AZa	9.85	19.85	1.85	<0.1

Çalışmada Muğla'nın Fethiye ilçesinde yapılan Eşen barajlarında şantiye sahasından alınan kil numunesi kullanılmıştır. Kil üzerinde yapılan elek ve hidrometre analizinde numunenin içerisinde %0 çakıl, %2 kum, %38 silt ve %60 kil olduğu belirlenmiştir. Eşen kilinin likit limiti %108, plastik limiti %38, maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.16 \text{ gr/cm}^3$ , optimum su muhtevası %38 olarak bulunmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zeminin CH (Yüksek plastisiteli kil) sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Kalay, 2010).

Yüksek plastisiteli kil olan Eşen Kilinin mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve kile karıştırılan katkı maddelerinin kilin mühendislik özelliklerinde nasıl etkiler oluşturacağını tespit etmek amacıyla; kil içerisine ağırlıkça %2, %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında ayrı ayrı amorf silika ve volkanik tuf ilave edilerek kıvam limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Kireç yüksek plastisiteli killerde %5-10 oranında karıştırılarak iyileştirme amaçlı kullanılmaktadır (Yıldırım, 2002). Bu çalışmada ağırlıkça %5 kireç oranı sabit tutularak yüksek plastisiteli Eşen Kiline, %2, %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında amorf silika ve volkanik tuf ilave edilerek deneyler tekrarlanmıştır.

Serbest basınç deneyleri ASTM D2166 standartlarında yapılmıştır. Serbest basınç deneylerinde No 40 elek altına geçen numuneler kullanılmıştır. Serbest basınç deney numunelerinin hazırlanması için 3,8 cm çap ve 7,6 cm yüksekliğindeki ikiye ayrılabilen ringler kullanılmıştır. Numuneler standart kompaksiyon deneyinde elde edilen 5,956 bar basınçla tek seferde özel olarak tasarlanan ring içerisinde maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında olacak şekilde hidrolik presle sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Numuneler sıkıştırma ringinden çıktıktan sonra ağırlık, çap ve yükseklik ölçümleri tekrar kontrol edilmiştir. Sıkıştırılan ve özenle ringten çıkarılan numuneler üzerinde 0.5mm/dk yükleme hızıyla serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

İncelenen zemin numunelerinin şişme basınçları, sabit hacim odometre deney yöntemi (ASTM D 4546-90 Metot C) kullanılarak belirlenmiştir. Zemin numuneleri 71,5 mm çapında 17 mm yüksekliğindeki odometre ringi içerisine, önceden belirlenen başlangıç koşullarına sahip olacak şekilde dinamik olarak 10 mm yüksekliğinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında zemin numunelerinin su muhtevalarının ve başlangıç kuru birim hacim ağırlıklarının değişmemesine özen gösterilmiştir. Ring içerisindeki numune odometre hücrelerine yerleştirildikten sonra kapiler yolla alt taraftan poroz taş seviyesine kadar su ilave edilmiştir. Böylelikle şişme olayı kontrollü bir şekilde devam etmiştir. Hücre tamamen su ile doldurularak numuneye serbestçe su girişine izin

verilmiş, ancak numunenin hacmi sabit tutulacak şekilde yüklemeler uygulanmıştır.

Yüklemelerin uygulanması sırasında, deformasyonların 0.005 mm de tutulmasına ve 0.01 mm den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat edilmiştir. Daha fazla yükleme yapılmaksızın numune hacminde herhangi bir artış eğiliminin gözlenmediği durumda deneye son verilmiştir. Zemin numunesine uygulanan nihai basınç, şişme basıncı olarak belirlenmiştir. Deney sonrasında ring içerisindeki numune kurutularak tartılmış ve numunelerin istenilen başlangıç koşullarında hazırlanıp hazırlanmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller neticesinde, kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerleri için, genellikle %1'den daha küçük sapmaların olduğu belirlenmiştir. İncelenen zemin numuneleri için, sabit hacim odometre deneyleri genellikle 6 günde şişmesini tamamlamıştır.

Serbest basınç deney sonrası kalan numuneler ile SEM analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde, numune yüzeyinden iyi bir sinyal almak için tozdan arındırıldıktan sonra karbon kaplama yapılmıştır. Karbon kaplama, vakum altında düşük gerilim verilerek oluşturulan arka karbon zerreciklerinin buharlaşması esasına dayanmaktadır (Erdin, 1987). Kaplanan numuneler taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilmiştir ve cihaz vakumlamaya bırakılmıştır. Vakumlama işleminin ardından SEM görüntüleri alınmıştır.

### 3. Araştırma Bulguları

#### 3.1. Deneysel Sonuçlar

Yüksek plastisiteli Eşen kiline ağırlıkça %2, %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında öncelikle volkanik tuf ve amorf silika katılarak oluşan numune üzerinde kompaksiyon, likit limit, plastik limit, tek eksenli serbest basınç ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Sonrasında yaygın olarak kullanılan bir zemin stabilizasyon yöntemi olan ve zemin kompaksiyonlarında su oranını azaltarak zeminin hacim değiştirmesini azaltan kireç ağırlıkça %5 oranlarında katılarak aynı volkanik tuf ve amorf silika oranlarında numuneler tekrar hazırlanmıştır. Bütün deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, kil numunesine amorf silika ilave edilmesi numunenin likit limit, plastik limit değerlerini ve serbest basınç mukavemetini arttırdığı, en yüksek serbest basınç direncinin ağırlıkça %20 amorf silika karıştırılması durumunda elde edildiği, ancak şişme basıncını yükselttiği görülmüştür.

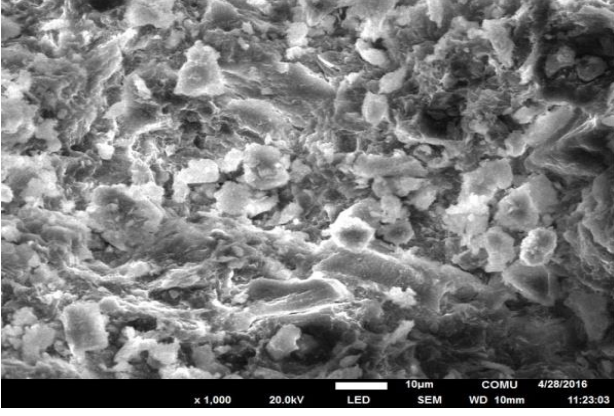
**Tablo 2.** Eşen kili ile katkılı numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları

Numune	W <sub>opt.</sub> (%)	Y <sub>kmax</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	WL (%)	WP (%)	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	Ps (kg/cm <sup>2</sup> )
% 100 Kil	38	1.16	108	38	1.96	1,60
%100Volkanik Tüf	23	1.44	-	-	0.38	0.003
%100 Amorf Silika	82	0.63	-	-	1.24	0.024
%2 Amorf Silika Katkılı Kil	42	1.20	97	40	2.58	0.856
%5 Amorf Silika Katkılı Kil	41	1.20	98	44	4.19	0.970
%10 Amorf Silika Katkılı Kil	28	1.22	100	45	7.00	1.917
%15 Amorf Silika Katkılı Kil	22	1.22	101	46	9.51	1.284
%20 Amorf Silika Katkılı Kil	30	1.20	103	48	14.99	1.926
%25 Amorf Silika Katkılı Kil	32	1.12	105	53	8.58	1.344
%2 Volkanik Tüf Katkılı Kil	38	1.20	108	33	3.50	1.500
%5 Volkanik Tüf Katkılı Kil	40	1.16	101	33	3.10	0.690
%10 Volkanik Tüf Katkılı Kil	46	1.16	94	35	1.36	0.380
%15 Volkanik Tüf Katkılı Kil	43	1.28	88	35	1.80	0.330
%20 Volkanik Tüf Katkılı Kil	32	1.28	80	35	2.55	0.240
%25 Volkanik Tüf Katkılı Kil	36	1.33	83	38	2.20	0.093
%5 Kireç Katkılı Kil	33	1.23	86	63	8.25	0.253
%2 Amorf Silika + %5 Kireç Katkılı Kil	32	1.21	98	59	5,58	0.165
%5 Amorf Silika + %5 kireç Katkılı Kil	38	1.20	96	60	5.95	0.233
%10 Amorf Silika + %5 Kireç Katkılı Kil	45	1.20	96	62	7.07	0.206
%15 Amorf Silika + %5 kireç Katkılı Kil	42	1.20	95	64	8.74	0.258
%20 Amorf Silika + %5 Kireç Katkılı Kil	42	1.18	96	69	9.02	0.209
%25 Amorf Silika + %5 Kireç Katkılı Kil	42	1.18	95	70	12.51	0.211
%2 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	32	1.28	100	72	9.60	0.170
%5 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	38	1.24	100	67	10.80	0.058
%10 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	36	1.26	95	62	5.20	0.110
%15 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	22	1.28	75	50	5.80	0.184
%20 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	31	1.28	66	50	5.40	0.032
%25 Volkanik Tüf + %5 Kireç Katkılı Kil	24	1.36	66	50	7.00	0.029

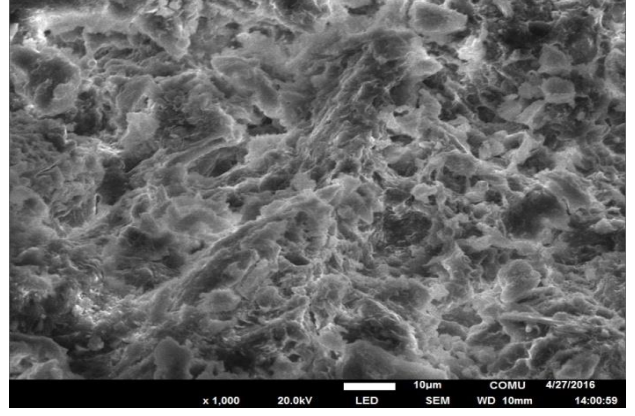
Kil numunesine volkanik tüf katkı maddesi ilave edilmesi, numunenin likit limit değerini azaltırken, plastik limit değerini arttırmakta, serbest basınç mukavemetini arttırmakta, şişme basıncını ise azaltmaktadır. Şişme açısından değerlendirildiğinde volkanik tüf uygun bir katkı malzemesi iken, serbest basınç direnci açısından amorf silika daha uygun bir katkı malzemesi olarak görülmektedir. Yüksek plastisiteli kil numunesine amorf silika ve kireç ilave edildiğinde, numunenin likit limit miktarı %95 - %96 değerlerinde elde edilmiştir. Amorf silika ve kireç serbest basınç mukavemetini arttırmakta, şişme basıncını ise düşürmektedir. Yüksek plastisiteli kil numunesine volkanik tüf ve kireç ilave edildiğinde, numunenin likit ve plastik limit değerlerini düşürdüğü, şişme basıncını azalttığı, kuru birim hacim ağırlığını ve serbest basınç mukavemetini arttırdığı görülmektedir. Volkanik Tüf katkısının yüksek

plastisiteli kile katıldığında şişme basıncını azalttığı, en düşük şişme basıncına %25 volkanik tüf + %5 kireç katkılı kil numunesinde elde edildiği görülmektedir.

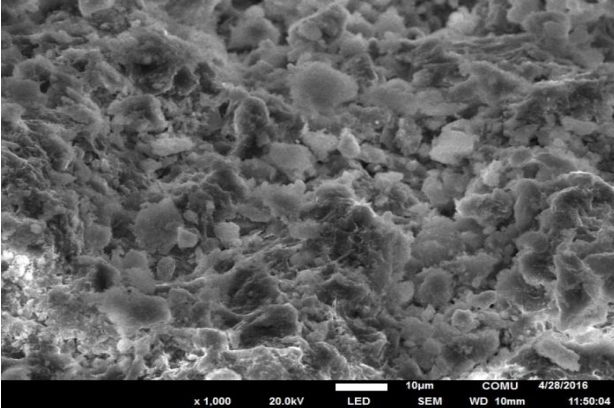
%2, %5 ve %10 amorf silika katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 3-5 'de; %2,%5 ve %10 Volkanik Tüf katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 6-8 'de; %2 amorf silika+%5 kireç, %5 amorf silika+%5 kireç, %10 amorf silika +%5 kireç katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 9-11 'de; %2 volkanik tüf+%5 kireç, %5 volkanik tüf+%5 kireç, %10 volkanik tüf +%5 kireç katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 12-14 'de verilmiştir.



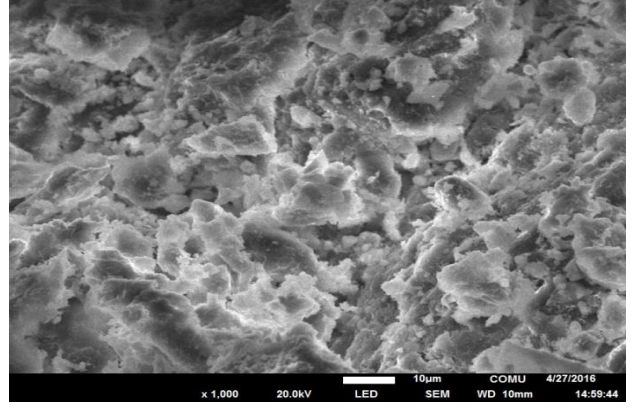
Şekil 3. %2 Amorf Silika katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



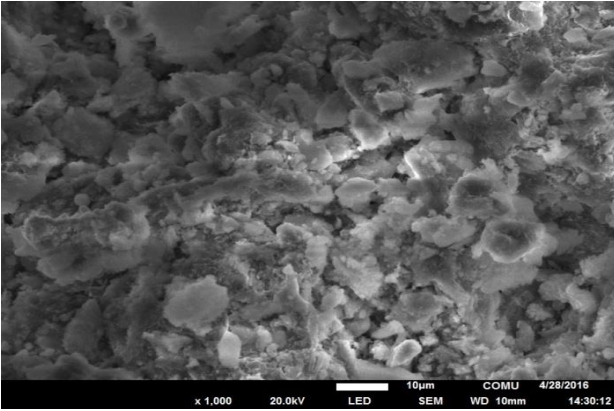
Şekil 6. %2 Volkanik tüf katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



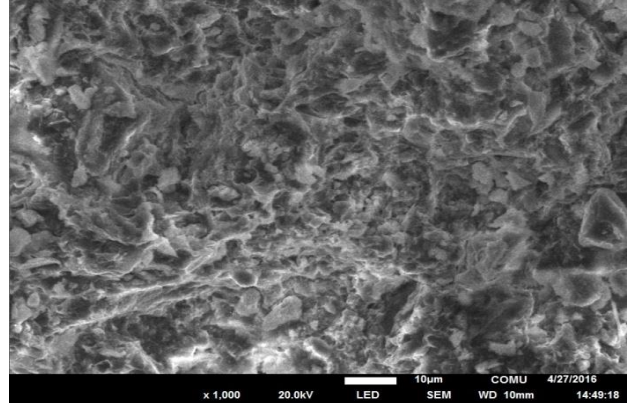
Şekil 4. %5 Amorf Silika katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



Şekil 7. %5 Volkanik tüf katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü

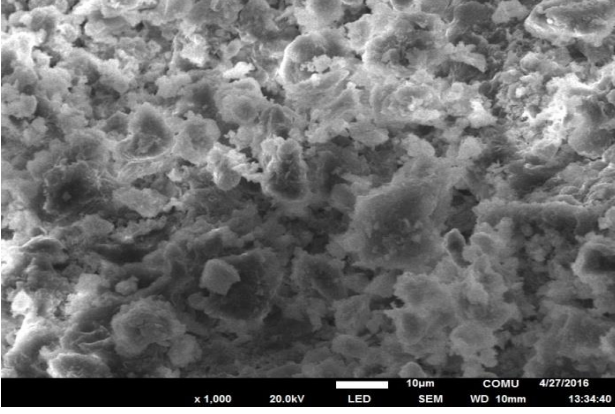


Şekil 5. %10 Amorf Silika katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü

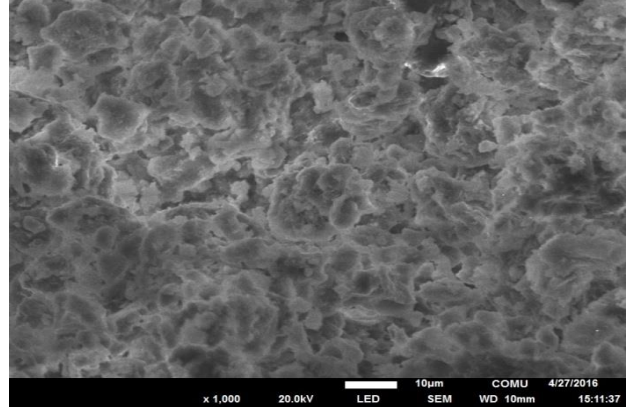


Şekil 8. %10 Volkanik tüf katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü

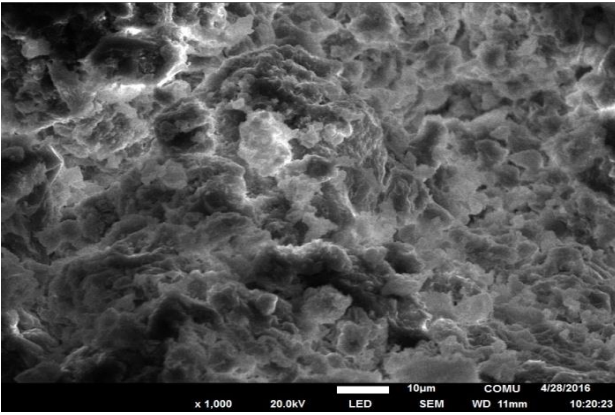




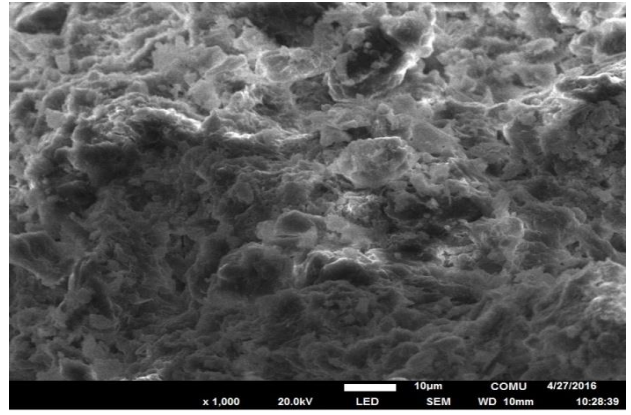
**Şekil 9.** %2 Amorf Silika+%5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



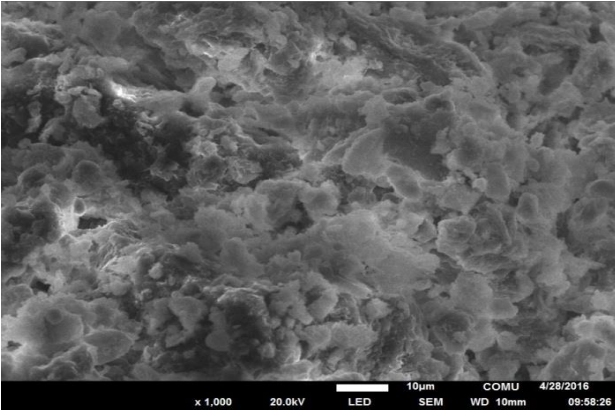
**Şekil 12.** %2 Volkanik tüf+ %5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



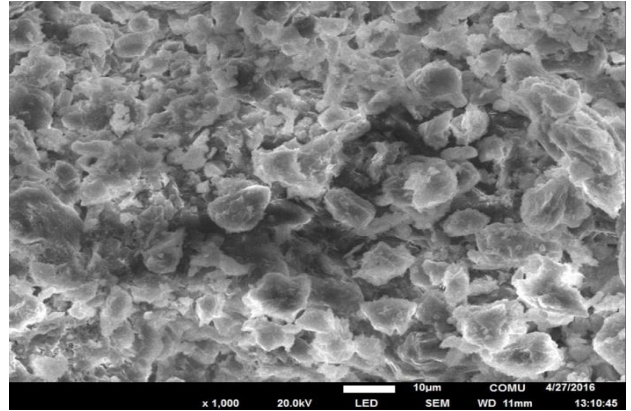
**Şekil 10.** %5 Amorf Silika+%5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



**Şekil 13.** %5 Volkanik tüf+ %5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



**Şekil 11.** %10 Amorf Silika + %5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü



**Şekil 14.** %10 Volkanik tüf+ %5 Kireç katkılı kil numunesinin SEM görüntüsü

SEM analizlerinin incelendiğinde, kil ve amorf silika karışımlarında Amorf silikanın özgül yüzey alanı kil daneciklerinden fazla olduğu için killerin üzeri kaplanmış bir şekilde görülmektedir. Kile amorf silika ve kireç karıştırıldığında ise kil üzerindeki amorf silika ve kireç aglomeralarının arttığı anlaşılmaktadır. Kil ve volkanik tüf karışımlarında ise kil üzerinde volkanik tüf aglomeraları keskin kenarlı ve yassı biçimde görülmektedir. Kile kireç ve volkanik tüfün

karıştırılmasında ise kil danelerinin arasının daha yoğun aglomera ile dolduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kile amorf silika, volkanik tüf ve kireç karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde;

- i. Kile karıştırılan amorf silika katkı malzemesinin artmasıyla optimum su muhtevasının azaldığı, kuru birim hacim ağırlığının ve serbest basınç direncinin arttığı belirlenmiştir. %10 amorf silika katkısına kadar şişme basıncı azalmakta %10 ve sonrasında ise şişme basıncı artmaktadır. Amorf silika katkısı %20 olduğunda serbest basınç mukavemeti ve şişme basıncı maksimum olmaktadır. Amorf silikadaki yüksek SiO<sub>2</sub> oranının şişmenin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- ii. Kile karıştırılan volkanik tüf katkı malzemesinin artmasıyla şişme basıncının azaldığı, artan katkı miktarına bağlı olarak oluşacak şişmenin hızlı bir şekilde tamamlandığı, serbest basınç dirençlerinin çoğunlukla arttırdığı belirlenmiştir. %20 volkanik tüf katkılı numunede maksimum serbest basınç mukavemeti elde edilmiştir. Volkanik tüfte amorf silikaya göre çok yüksek olan CaO oranının şişme basıncının azalmasına ve serbest basınç mukavemetinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- iii. Sönmüş kireç katkısının %5 oranında sabit tutulup amorf silika katkı maddesinin artırılmasıyla hazırlanan numunelerde yapılan serbest basınç deneylerine göre amorf silika miktarı artarken kilin serbest basınç direncinin arttığı, kuru birim hacim ağırlığının azaldığı, şişme basınçlarının azaldığı görülmüştür. %20 amorf silika katkılı numune ile karşılaştırıldığında serbest basınç direncinin ve şişme basıncının azaldığı görülmektedir. Kireçteki çok yüksek olan CaO oranının Amorf silikadaki yüksek olan SiO<sub>2</sub> etkisini azaltarak şişmenin azalmasına ve serbest basınç mukavemetinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- iv. Sönmüş kireç katkısının %5 oranında sabit tutulup volkanik tüf katkı maddesinin artırılmasıyla hazırlanan numunelerin üzerinde yapılan serbest basınç deneylerine göre serbest basınç dirençlerinin katkısız duruma göre artış gösterdiği, kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı, optimum su muhtevalarının düştüğü, şişme basınçlarının azaldığı görülmüştür. %20 volkanik tüf katkılı numune ile kıyaslandığında daha yüksek serbest basınç mukavemeti elde edilirken, şişme basıncının azaldığı görülmüştür.

Yapılan deneyler sonucunda katkı malzemeleriyle kil arasında oluşan puzzolanik reaksiyonlar zeminin mühendislik özelliklerinde değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Amorf silika ile volkanik tüf katkı malzemelerinin kil zeminlerin iyileştirilmesinde kireç ile karıştırılarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda, bu katkı malzemelerinin farklı tür zeminlerde hangi oranlarda kullanılması gerektiği belirlenmelidir. Bu çalışmada sınırlı sayıda mühendislik özellik incelenmiştir. Diğer mühendislik özellikler ayrıca değerlendirilmelidir.

## Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar

- As, M., Çokça, E., 2014. Döngüsel Şişme Ve Büzülmenin C Sınıfı Uçucu Kül İle Stabilize Edilen Şişen Zeminin, Şişme Yüzdesi Üzerindeki Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi 16 17 Ekim Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 143-152.
- Aydın, S., 2010. Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç Ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Baykal, G., Döven A., G., 1996. Uçucu Külün Akıcı Dolgu Olarak Geoteknik Uygulamaları. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, 24 - 25 Ekim, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 453-464.
- Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R.G., and Gandhi, S.R., 2007. "Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils", First International Conference on Soil and Rock Engineering, Columbo, Srilanka, August 5-11.
- Bilgen, G., Kavak, A., Çarpan, Ö., F., 2012. Deniz Suyu ve Kirecin Bentonit Kilinin Mukavemet Değerlerine Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi 4 - 5 Ekim Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 581-590.
- Brigatti, M., Creme F., 1983. Kil Minerallerinin Tanımı. New York: 86-177.
- Chauhan, M.S., Mittal, S., Mohanty, B. 2008. Performance Evaluation of Silty Sand Subgrade Reinforced With Fly Ash and Fibre. Geotextiles and Geomembranes. 26, 429-435.
- Çimen, Ö., Dereli, B., Yıldırım, F., Şefkatlioğlu, Ö., F., Eralp, A., Günaydın, H., İ., 2013. Manisa - Kula Yöresi Volkanik Tüfünün Yüksek Plastisiteli Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, 5-7 Aralık, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Erdin, N., 1987. Tarama Elektron Mikroskopunun Temel Prensipleri ve Numune Hazırlama, İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi, 36(2), 102-124.
- Fındık S., 2005. Karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların

kullanılabilirliği, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans tezi, Isparta.

İnan, G., Alper, S., Ramyar, K., Yılmaz, H., R., 2005. Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(1), 19-25.

Kalay, E., 2010. Farklı Katkı Maddeleri İle Zemin İyileştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s. Isparta.

Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A. 2005. Stabilisation of Clayey Soils With High Calcium Fly Ash and Cement. Cement & Concrete Composites. 27, 301-313.

Mohammed Ali, M., 2012. Kireç Ve Uçucu Kül İle Stabilize Edilen Şişen Killerde Esneklik Modülü Tayini. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s. İstanbul.

Oweiss, I. and Bowman, J., 1981. Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, 107, p.319-338.

Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale R.K. 2004. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils. Construction and Building Materials. 18, 263-267.

Tan, O., İyisan, R., 1996. Uçucu Kül İle Zemin Stabilizasyonu. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, 24 -25 Ekim, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 417-425.

Taytak, B., 2012. Biyopolimer Katkılarının Killi Zeminlerin Kompaksiyon, Permeabilite Ve Kayma Dayanımına Etkisinin Araştırılması. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 81. İzmir.

Türköz M., 2006. Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve Eskişehir Meşelik Killerine Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi. C.XIX, S.2.

Ünver, E., 2015. Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 155s. Eskişehir.

Yıldırım, S., 2002. Zemin incelemesi ve Temel Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul, 466s.