

Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi

Ömür ÇİMEN*¹ , Erhan KELEŞ*² 

*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, 32200, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 21.09.2020, Kabul Tarihi: 16.11.2020

Özet

Şişme ve büzülme potansiyeline sahip killer ülkemizin birçok bölgesinde bulunmaktadır. Şişen killerin hacim değiştirme kapasitesine bağlı olarak oluşan düşey deformasyonlar yapıda hasarlar oluşturabilmektedir. Temel zeminin şişme özelliği gösteren kil mineralleri içermesi durumunda, hafif yüklenmiş yapıların aktardığı düşük düşey basınç nedeniyle yapıda farklı oturmalar oluşmakta ve büyük hasarlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli Eşen kiline ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında Afşin-Elbistan uçucu külü ilave edilerek kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, kireç miktarı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak aynı deney serisi tekrarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Afşin-Elbistan uçucu külünün yüksek plastisiteli Eşen kilinin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stabilizasyon, Yüksek plastisiteli kil, Afşin-Elbistan uçucu külü, Kireç.

The Effect of Fly Ash and Lime Additives on the Engineering Properties of a High Plasticity Clay

Abstract

Clays with the potential to swell and shrink are found in many regions of our country. Vertical deformations that occur depending on the capacity of volume changing of the swelling clays can cause damage to the structure. In the case of a foundation ground contains swelling clay minerals, different settlements in the structure occur due to the low vertical pressure transferred by the lightly loaded structures and it may cause major damage. In this study, consistency limits, compaction, free pressure, and swelling pressure tests were carried out by adding Afşin-Elbistan fly ash of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight to high plasticity Eşen clay. Then the same series of experiments was repeated, keeping the lime amount constant at 6% by weight. As a result of the experimental studies, it was determined that Afşin-Elbistan fly ash improved the engineering properties of Eşen clay with high plasticity.

Keywords: Stabilization, High plasticity clay, Afşin-Elbistan fly ash, Lime.

¹Sorumlu yazar omurcimen@sdu.edu.tr, ²ins.muherhankales@gmail.com

1. GİRİŞ

Zemin, kayaçların kimyasal ve fiziksel ayrışma sonucu meydana gelen, yük altında şekil değiştirmelere uğrayan, yol, köprü, baraj ve hava alanı gibi her türlü mühendislik yapılarının üzerine inşa edildiği ve bu şekilde yapıların yükünü güvenle taşımasını beklediğimiz daneli bir yapıdır. Mühendislik yapılarını inşa etmeyi planladığımız alanların bir kısmı istediğimiz mühendislik parametrelerine sahip iken bir kısmı da istediğimiz özelliklere sahip olmayabilir. Özellikle, sosyo-ekonomik gelişmelerden dolayı kentlerin büyümesi ve arzu edilen mühendislik özelliklere sahip yerlerin azalması bizleri uygun taşıma gücüne sahip olmayan yerlere yapıları inşa etmeye zorlamaktadır. Yapı inşası için elverişsiz olan zeminleri, yapı inşasına uygun hale getirmek için birtakım çalışmalar yapmak gerekebilir. Bunlardan birkaçı, derin temel yapmak, yumuşak zemin tabakasının yeteri derinliğe kadar kazılarak yerine uygun zeminin konulması ya da gerek kimyasal gerekse atık malzemelerin zemine ilave edilerek zeminin yerinde stabilize edilmesidir.

Stabilizasyon, zayıf dayanım özelliklerine sahip zeminin çeşitli zemin iyileştirme yöntemleriyle dış kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale getirilmesidir (Cömert, 2005). Katkılı zemin iyileştirmesi, derin temel uygulamalarına kıyasla daha ekonomik olması ve uygulama teknikleri açısından daha basit olmasından dolayı zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde uygun bir yöntem olabilmektedir. Zemin stabilizasyonunda, zeminin daha sıkı bir duruma gelmesi, taşıma gücünün ve kayma direncinin artırılmasının yanı sıra sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir (Türkel, 2019). İyileştirme yapılmasındaki maksat ve zeminin davranışı, zemin stabilizasyonundaki uygulanacak yöntemin seçimini etkileyen parametrelerdendir. Kireç, uçucu kül, volkanik tuf, çimento, pomza ve bitüm gibi doğal ve yan ürün konumundaki katkı maddelerinin ilave edilerek yapılan iyileştirme en yaygın kullanılan yöntemlerdendir (Güçek, 2011).

Atık malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanılması, stabilizasyon girdilerini azaltmakla beraber bu atık malzemelerin depolanma giderlerini de azaltır (Baykal vd. 2004). Günümüzde, yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Literatürde atık malzemelerin zemin iyileştirilmesinde kullanımıyla ilgili çalışmalar hızla artmaktadır (Kalay, 2010). Bu çalışmalar şöyle sıralanabilir. Beyaz, sarı ve yeşil Bayburt taşı atıklarının zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilir olduğu (Yılmaz, 2015), elektrik ark fırını (EAF) cürufu katkısının zemin

stabilizasyonunda kullanılabilmesi (Mahmoudi Moghaddam, 2011), kırmızı çamur, silis dumanı ve kireç ile muamele edilen mikronize kilin, serbest basınç, şişme basıncı ve geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesiyle geoteknik problemlerin çözümünde faydalı sonuçlar ortaya koyduğu (Pekdemir, 2013), Afşin-Elbistan uçucu külünün zemin iyileştirmede kullanılabilmesi (Öksüz, 2006), statik ve sismik yükler altında mukavemet ve taşıma gücü kaybına uğrayarak ciddi boyutta şekil değiştirmelere maruz kalabilecek sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimentoyla birlikte kullanılacak bazalt fiberin, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabilmesi (Türkel, 2019), göçebilen bir zeminin iyileştirilmesinde atık pirinç kabuğu külü ve çimentonun birlikte kullanılabilmesi (Basha vd. 2005) belirtilmiştir. Endüstriyel atıkların kilin mukavemet özelliklerini iyileştirmek için kireç ile birlikte kullanılabilmesi gösterilmiştir (Bhardwaj and Sharma, 2020). Ağırılıkça %5 jips katkısı ile şişebilen killerin etkin bir şekilde iyileştirilebileceği (Civelekoğlu, 2009), yumuşak bir kile ağırılıkça %1 kopolimer ve %10 uçucu kül ilave edilerek yalın numunenin serbest basınç mukavemetinin %581 arttığı belirtilmiştir (Çetin, 2011). %2 kolemanit katkısı ve %6 amorf silika katkısının bentonit kilinde iyileştirme amaçlı kullanılabilmesi, %5 kireç katkısı sabit tutularak, artan amorf silika miktarının serbest basınç mukavemetini artırdığı belirlenmiştir (Dereli, 2013). %1.5 keçiyoynuzu gam katkısıyla doğal kilin serbest basınç mukavemeti %233 oranında arttığı, %1.5 biyopolimer+%5 pomza katkısı ile kilin serbest basınç mukavemetinin %237 arttığı tespit edilmiştir (Gencer, 2018). %3 kireç ve %10 silis dumanı katkısının zeminin mühendislik özelliklerinde önemli seviyede iyileşme sağladığı belirtilmiştir (Taşçı, 2011). %10-20 oranları arasında mermer toz atıklarının stabilizasyonda kullanılabilmesi belirtilmiştir (Yıldız, 2008). Uçucu kül ile iyileştirilmiş killerde serbest basınç direncinin ve CBR değerlerinin yükseldiği ve uçucu küllerin karayolu inşasında yumuşak alt temel iyileştirilmesinde kullanılabilmesi gösterilmiştir (Şenol vd. 2006). %6-10 oranlarında çimentonun kilin drenajsız kayma mukavemetini artırıcı bir etki sağladığı belirtilmiştir (Kılıç, 2008). %5 kireç, %3.33 çelikhane cürufu ve deniz suyu ile karıştırılan düşük plastisiteli killerde serbest basınç mukavemetinin 16 kat artış gösterdiği, %7.5 kireç, %3.33 çelikhane cürufu ve deniz suyu karıştırılan yüksek plastisiteli killerde ise 10 kat artış gerçekleştirdiği gösterilmiştir (Bilgen, 2011). Soğuk bölgelerde yol dolgusu yapılırken uçucu kül kullanımının boşluk oranını arttırması nedeniyle daha düşük ağırlık, daha yüksek stabilite sağladığı belirtilmiştir (Baykal vd., 2004). Ağırılıkça %5-10 oranlarında kireç çamuru, kumlu kil, killi balçık ve ağır kil zeminleri üzerinde olumlu etki

yaparak orman yollarında kireç çamurunun iyileştirme amaçlı kullanılabilmesi belirtilmiştir (Eroğlu, 2003). İnşaat yıkıntı atığının kaolin kilinin taşıma gücü oranında (CBR) %500'ü aşan bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir (Kalem, 2015). Uçucu küle %10 atık lastik ve bentonit ilave edildiğinde elde edilen hidrolik geçirgenliğin kaplama malzemesi olarak kullanılabilir standartlarda olduğu gösterilmiştir (Çokca ve Yılmaz, 2004). Silika dumanı ve kireç katkılarının kilin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Türköz vd., 2018). %10 kolemit atığı ve %10 kireç katkısının, yüksek plastisiteli killi yol taban zemininin; işlenebilirlik, plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım gibi mühendislik özelliklerini iyileştirdiği gösterilmiştir (Yeşilççek, 2016). %30 perlit ve %8 kireç katkısının zemin stabilizasyonunda kullanılabilmesi belirtilmiştir (Çalık, 2012). Magnezyum klorür solüsyonunun problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilmesi ve özellikle %7 katkı seviyesinde etkin bir iyileştirme sağlandığı belirtilmiştir (Açaz, 2011). Ağırlıkça %10-%20 oranlarında inşaat atıklarının kilin serbest basınç mukavemetini artırdığı ve şişme basıncının azaltılmasında kullanılabilmesi belirtilmiştir (Çimen vd., 2017).

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül ilave edilerek, karışım numunelerinde kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, uçucu kül-kil karışımlarına kireç katkısının etkisi de araştırılmıştır. Sonuçta, kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kirecin etkisi belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eşen Kilinin Özellikleri

Kil zeminler, genel olarak su muhtevsındaki değişime bağlı olarak hacim değişimine uğrarlar. Hacim değişimi, kurumada büzülme ve ıslanmada şişme olarak kendini gösterir. Eğer zemin kurumayı takiben ıslatılırsa, şişme oluşur. Büyük hacimsel değişiklikler birbirini izleyen kurak ve yağmurlu mevsimlere sahip iklim koşullarında gözlenir. Killi zeminlerin mühendislik yapılarını önemli derecede etkileyen özelliği oturma, mukavemet, şişme ve büzülmedir. İyi projelendirilmemiş bir yapıda büzülme ve şişmeden kaynaklı oluşan deformasyonlar yapı için sürekli bir tehdit oluşturmaktadır (Oweiss ve Bowman, 1981).

Bu çalışmada Muğla'nın Fethiye ilçesinde yapılan Eşen barajlarının şantiye sahasından temin edilen kil numunesi ile çalışılmıştır. Numune üzerinde elek analizleri, kıvam limitleri, hidrometre ve standart kompaksiyon deneyleri

yapılmıştır. Kil üzerinde yapılan zemin sınıflandırma deneylerinden sonra numunenin içerisinde %0 çakıl, %2 kum, %38 silt ve %60 kil olduğu belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zeminin CH (Yüksek plastisiteli kil) sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Kalay, 2010). Eşen kilinin fiziksel görüntüsü Şekil 1 'de, kimyasal analiz test sonuçları Tablo 1 'de, X-Ray cihazı ile tanımlanan minerallerin çokluk sırasına göre sıralanmış hali Tablo 2 'de ve mühendislik özellikleri ise Tablo 3 'te verilmiştir.



Şekil 1. Eşen kilinin fiziksel görüntüsü

Tablo 1. Eşen kilinin kimyasal içeriği

Oksitler	(% ağırlık)
Na ₂ O	<0.1
MgO	17.4
Al ₂ O ₃	4.3
SiO ₂	47.1
P ₂ O ₅	<0.1
K ₂ O	0.3
CaO	2.8
TiO ₂	0.2
MnO	0.1
Fe ₂ O ₃	16.6
A.Za	9.85

Tablo 2. Eşen kilinin mineral içeriği

Çokluk sırasına göre mineraller
Simektit grubu mineral, serpantin grubu mineral, kuvars, kalsit, amorf silika, amfibol grubu mineral (çok çok az), feldispat (çok çok az), klor grubu mineral (çok çok az)

Tablo 3. Eşen kilinin mühendislik özellikleri

Özellikler	Miktarı
$W_R(\%)$	21
$W_L(\%)$	108
$W_p(\%)$	38
PI(%)	70
$\Upsilon_{kmax}(gr/cm^3)$	1.16
$W_{opt}(\%)$	38
$\Upsilon_s(gr/cm^3)$	2,70

W_R rötre limiti, W_L Likit limit, W_p plastik limit, PI plastisite indisi, Υ_{kmax} maksimum kuru birim hacim ağırlık, W_{opt} optimum su muhtevası, Υ_s dane birim hacim ağırlık

2.2. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Özellikleri

Ağırlıkça %80 'ni No:200 elekten geçecek şekilde öğütülerek toz haline getirilen düşük kalorili kömürler, elektrik enerjisi üretmek için termik santrallerde kullanılan başlıca yakıt çeşitleridir. Sıcak havayla beraber fırına gönderilen toz halindeki kömürün yanması neticesinde gazlar ve atık maddeler açığa çıkar (Erdoğan, 1993). Toz halindeki kömürün yakılması sonucunda açığa çıkan, bünyesinde katı partiküller bulunduran çeşitli gazlar bacadan yukarı doğru sürüklenirler. Bacadan yukarı yönlü hareket eden gazların bünyesindeki katı partiküllerinin atmosfere geçişini önlemek için bacalara silikonlar ve elektro filtreler konulur. Bu filtreler vasıtasıyla, gaz ile karışık katı partiküllerinin yaklaşık %99 'u atmosfere geçmeden tutularak hapsedilir. Bu şekilde biriken camsı katı yığıntıya uçucu kül denilmektedir (Öksüz, 2006). Bu küller süngerimsi mineral, içi boşluklu tanecikler ve yanmamış kömür partiküllerinden meydana gelir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine bakıldığında, genel olarak %85'ini SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , ve MgO oluşturur (Tokuy ve Erdoğan, 1998).

Termik santrallerde üretilen elektrik enerjisi, ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin %50 'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Yine ülkemizde her yıl yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül, termik santral yan ürünü olarak üretilmektedir. Bu yan ürünler çevresel sorunlar oluşturmakla beraber taşıma ve depolama masraflarını artırıp işletme girdilerini artırıcı bir etki de yapmaktadır. Ülkemizde bol miktarda bulunduğu halde, bu atık ürünlerin gerek imhası gerek başka sektörlerde kullanılarak faydalanılması hususunda yeterli derecede çalışmalar yapılmamaktadır. Santrallerden uzaklaştırılması ciddi problemler oluşturan hatta taşıma ve depolama sırasında enerji ve parasal kaynak harcanan bu atıkların başka sektörlerde kazandırılması faydalı

olacaktır. Uçucu küllerin kullanılabilceği alanları belirlemek adına bir araştırma yapıldığında inşaat endüstrisi karşımıza çıkmaktadır. Yapı malzemesi, çimento üretimi, hazır beton üretimi ve hafif yapı malzemesi üretimi alanlarında uçucu küller tercih edilebilmektedir. Geoteknik uygulamalarında da son derece uygun ve ekonomik çözümler sunabildiği belirtilmektedir. Bu atıklar, dolguların stabilizasyonu, altyapı ve taban malzemesi, alt drenaj tabakası, iri zemin iyileştirme malzeme boşluklarını doldurma ve zemin enjeksiyonu uygulamalarında da kullanılabilirler (Öksüz, 2006).

Bu çalışmada, Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Afşin-Elbistan termik santralinde yakıt olarak linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu linyit kömürü Kahramanmaraş ilinin Afşin ve Elbistan ilçelerinin sınırları içindeki 120 km²'lik bir alanda üretilmektedir. Halen işletme faaliyetleri devam etmekte olan havzanın kışlaköy açık işletmesi, Afşin ilçe merkezine 15 km ve Elbistan ilçe merkezine ise 26 km mesafede bulunmaktadır (Öksüz, 2006). Afşin-Elbistan uçucu külünün fiziksel görüntüsü Şekil 2 'de, kimyasal içeriği Tablo 3 'te, mineral içeriği Tablo 4 'te ve mühendislik özellikleri Tablo 5 'te verilmiştir.

**Şekil 2.** Afşin-Elbistan uçucu külünün fiziksel görüntüsü**Tablo 3.** Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal içeriği

Oksitler	% Ağırlık
Na_2O	0.03
MgO	1.38
Al_2O_3	12.79
SiO_2	31.25
P_2O_5	0.21
K_2O	0.57
CaO	41.73
TiO_2	0.23
MnO	0.02
Fe_2O_3	4.94
A.Za	5.72

Tablo 4. Afşin-Elbistan uçucu külünün mineral içeriği

Mineraller
Analcline, Anyhdrite, Calcite ve Quartz

Tablo 5. Afşin-Elbistan uçucu külünün mühendislik özellikleri

Özellikler	Miktarı
$W_R(\%)$	--
$W_L(\%)$	--
$W_P(\%)$	--
$PI(\%)$	--
$\gamma_{kmax}(gr/cm^3)$	1.13
$\gamma_s(gr/cm^3)$	2.75
$W_{opt}(\%)$	40

2.3. Kirecin Özellikleri

Kireç, yüksek kalsiyumlu, magnezyumlu veya dolomitik yapıda olabilen ve sedimanter bir kayacın doğal kireçtaşından üretilir. Kireçtaşının yapısı ve üretim süreci, üretilen kirecin tipini belirler. Yüksek kalsiyumlu sönmemiş kireç (CaO), monohidre dolamatik kireç (Ca(OH)₂MgO) ve yüksek kalsiyumlu sönmüş kireç (Ca(OH)₂) zemin iyileştirmede en çok kullanılan kireç tipleridir (Kalay, 2010). Kil mineralleri ve kireç arasında reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlardan dolayı kireç, kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminlerde iyi bir iyileştirme sağlar (Özaydın, 2011). Kireç stabilizasyonu, zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, şişme potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin bozulmasının daha sınırlı kalmasını yani dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca zeminin plastisitesini azalttığı için arazi çalışma koşullarını iyileştirmektedir. Kireçle stabilizasyon genellikle killi zeminlerle yapılan dolgularla özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır (Özaydın, 2011).

Literatüre bakıldığında, yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda ağırlıkça %3-10 oranında kireç kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada %6 oranında sönmemiş kireç kullanılmıştır. Kullanılan kirecin kimyasal içeriği Tablo 6 'da ve mineral içeriği Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 6. Kirecin kimyasal içeriği

Oksitler	% Ağırlık
Na ₂ O	<0.1
MgO	0.4
Al ₂ O ₃	<0.1
SiO ₂	0.1
P ₂ O ₅	<0.1
K ₂ O	<0.1
CaO	79.3
TiO ₂	<0.1
MnO	<0.1
Fe ₂ O ₃	0.1
A.Za	19.89

Tablo 7. Kirecin mineral içeriği

Mineraller
Portlandit, Aragonit (az), kalsit (az), illit (çok çok az)

2.4. Araştırma Kapsamında Yapılan Deneyler

Kilin kıvam limitlerine, kompaksiyon parametrelerine, şişme potansiyeline ve serbest basınç direncine Afşin-Elbistan uçucu külü ve kirecin etkilerinin belirlenmesi amacıyla kile Ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında Afşin-Elbistan uçucu külü ilave edilmiştir. Daha sonra kireç ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak aynı deney serisi tekrarlanmıştır. İkili karışım olarak adlandırılan kil-uçucu kül deneylerinin tamamlanmasının ardından üçlü karışım (kil-uçucu kül-kireç) deneyleri yapılmıştır.

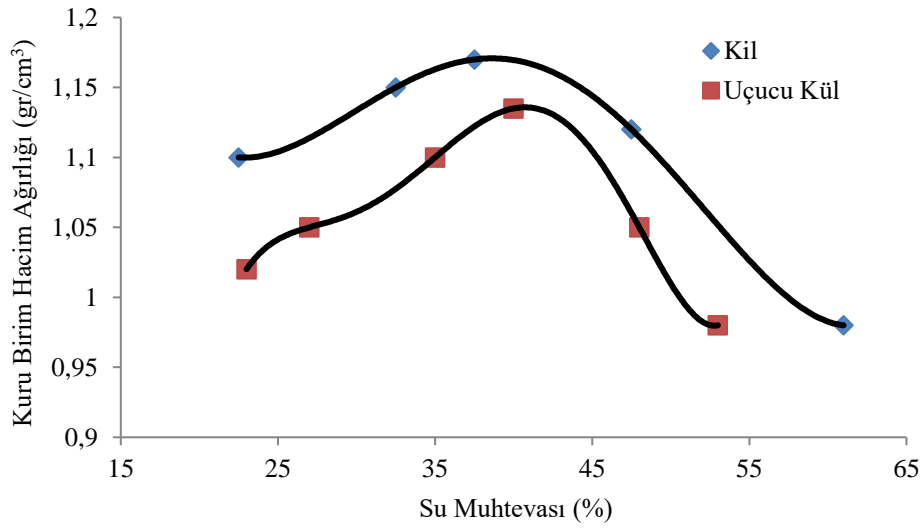
Kıvam limitleri olarak bilinen likit ve plastik limitin belirlenmesinde ASTM D 4318-05 deney metodu kullanılmıştır. Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç, No 40 elekten elenerek, yukarıda belirtilen miktarlarda yine No 40 elekten elenen kile eklenmiştir. Numunelerin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D 698-07 E1 standartlarındaki standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Her bir karışım oranı için standart kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası verilerinden yararlanılarak hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. ASTM D2166 / D2166M-13 standartlarında yapılan serbest basınç deneylerinde No 40 elek altına geçen numuneler kullanılmıştır. Serbest basınç numuneleri 3.8cm çapında ve 7.6cm yüksekliğinde ikiye ayrılabilen ringin içine sıkıştırılmıştır. Ringden çıkarılan numuneler üzerinde 0.5 mm/dk yükleme hızıyla yükleme yapılarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. İncelenen zemin numunelerinin

şişme basınçları, sabit hacim ödometre deney yöntemi ASTM D 4546-90 metot C kullanılarak belirlenmiştir.

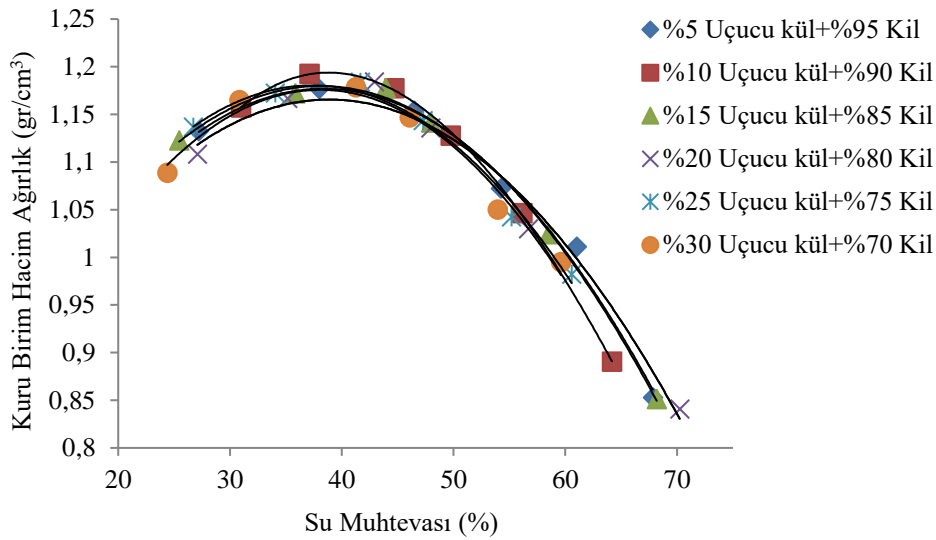
3. BULGULAR

Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü üzerinde yapılan standart kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 3 'te, kile belli oranlarda uçucu kül ilave edilerek yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon grafikleri Şekil 4 'te ve kil-uçucu kül karışımlarına kireç katkısı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak yapılan kompaksiyon deneyleri

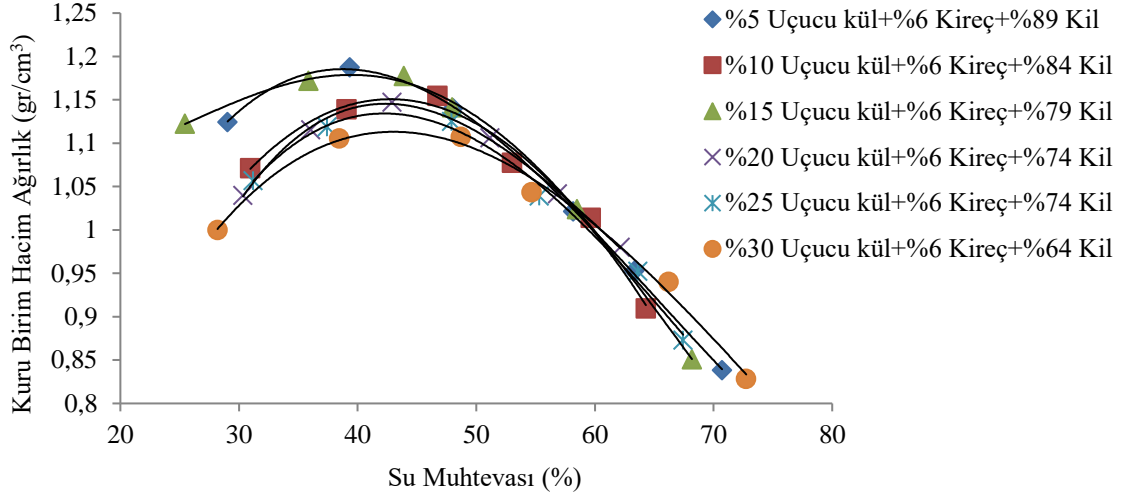
sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri ise Şekil 5 'te verilmiştir. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri Şekil 6 'da, kile belli oranlarda uçucu kül ilave edilerek yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri Şekil 7 'de ve kil-uçucu kül karışımlarına kireç katkısı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri ise Şekil 8 'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 8 'de görülmektedir.



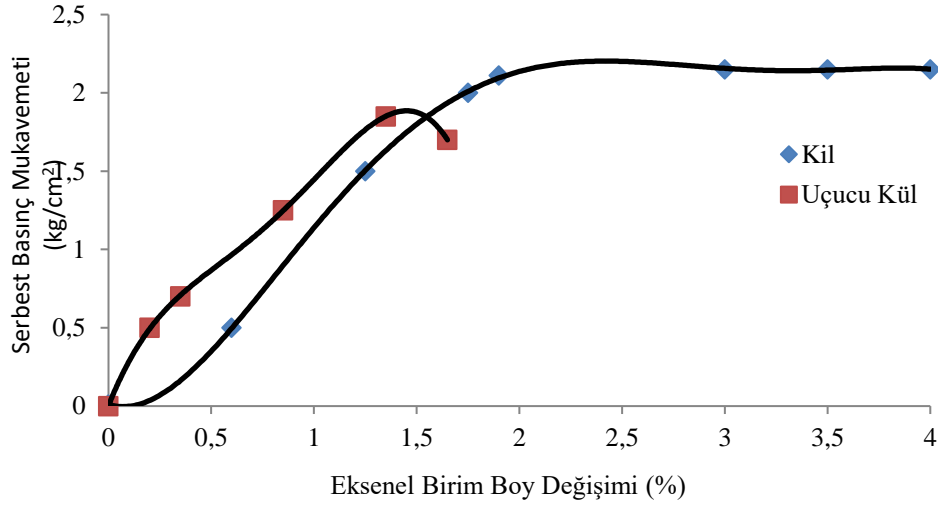
Şekil 3. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü numunelerinin kompaksiyon eğrileri



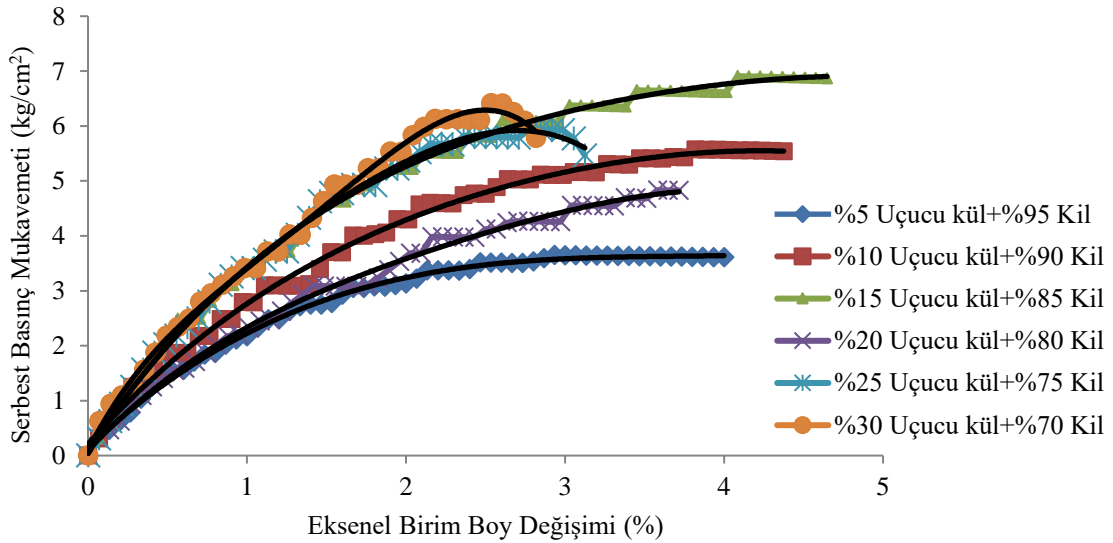
Şekil 4. Afşin-Elbistan uçucu külü katkılı eşen kili numunelerinin kompaksiyon eğrileri



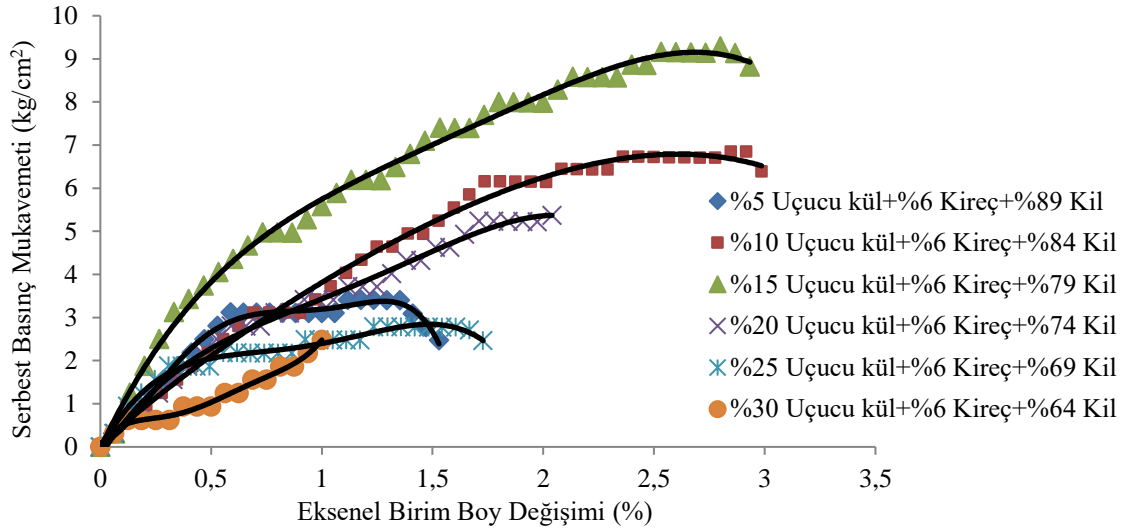
Şekil 5. %6 kireç ve Afşin-Elbistan uçucu külü katkıları ile eşen kili numunelerinin kompaksiyon eğrileri



Şekil 6. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri



Şekil 7. Afşin-Elbistan uçucu külü katkıları ile eşen kili numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri



Şekil 8. %6 kireç ve Afşin-Elbistan uçucu külü katkılı Eşen kili numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri

Tablo 8. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları

Numune	W _L (%)	W _P (%)	PI (%)	γ _{kmax} (gr/cm ³)	ω _{opt} (%)	q _u (kg/cm ²)	P _s (kg/cm ²)
%100 Kil	108	38	70	1.16	38	1.96	1.60
%100 UK	--	--	--	1.13	40	1.85	0.17
%5 UK katkılı kil	103	34	69	1.17	40	3.64	1.56
%10 UK katkılı kil	90	39	51	1.2	40	5.63	0.79
%15 UK katkılı kil	88	44	44	1.185	38	6.90	0.55
%20 UK katkılı kil	82	53	29	1.180	43	4.80	0.24
%25 UK katkılı kil	82	56	26	1.19	38	5.95	0.59
%30 UK katkılı kil	81	52	29	1.17	35	6.40	0.59
%5 UK +%6 K katkılı kil	89	59	30	1.16	42	3.40	1.01
%10 UK +%6 K katkılı kil	81	57	24	1.16	44	6.85	0.40
%15 UK +%6 K katkılı kil	80	54	26	1.15	40	9.28	0.35
%20 UK +%6 K katkılı kil	85	53	32	1.15	43	5.40	0.10
%25 UK +%6 K katkılı kil	80	54	26	1.13	44	2.78	0.36
%30 UK +%6 K katkılı kil	79	55	24	1.12	44	2.48	0.25

Tablo 8 incelendiğinde, likit limit değerinde %27 'lere varan bir azalma, plastik limit değerinde %55 'lere varan bir artma, plastisite indisinde %66 'lara varan bir azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta karışımlara bağlı olarak azalma ve artmalar, optimum su muhtevasında genellikle bir artma, serbest basınç mukavemetinde %370 'lere varan bir artma ve şişme basıncında ise önemli miktarlarda azalma gözlenmiştir. Kireç ilavesi ile

bu artış ve azalmaların daha belirgin olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külü kullanılarak yapılan deneylerde katkı maddesi miktarının artması ile likit limit değerinin, plastisite indisinin ve şişme basıncının azaldığı, bunlara karşın plastik limit değerinin,

maksimum kuru birim hacim ağırlığın, optimum su muhtevasının (genellikle) ve serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. İdeal uçucu kül oranı katkı miktarı ağırlıkça %15 olduğu bulunmuştur.

Kil-uçucu kül karışımlarına ağırlıkça %6 kireç eklenerek aynı deney serisi devam ettirilmiştir. Kil-uçucu kül-%6 kireç karışımlarında uçucu kül miktarının artması ile likit limit değerinin, plastisite indisinin, maksimum kuru birim hacim ağırlığın ve şişme basıncının azaldığı, bunlara karşın plastik limit değerinin, optimum su muhtevasının ve serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Kireçli ideal uçucu kül oranı katkı miktarının ağırlıkça yine %15 olduğu bulunmuştur. Bulgular literatür ile uyumlu elde edilmiştir.

Afşin-Elbistan uçucu külü, Eşen kilinin yapısındaki boşluklu yapıyı azaltarak maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve serbest basınç mukavemetini artırmıştır. Ayrıca, kil mineralleri ile kireç ve Afşin-Elbistan uçucu

külü arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelmiş ve bu reaksiyon, Eşen kilinin serbest basınç mukavemetini oldukça fazla artırmıştır.

Serbest basınç mukavemeti artması ile şişme basıncının azalması, kildeki katyon değiştirme kapasitesi, flokülasyon ve aglomerasyon reaksiyonlarından ve zemin katkı karışımındaki puzolanik reaksiyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç ilavesi ile kil tanelerinde topaklanmalar meydana gelmiş ve kil taneleri daha iri bir zemin tanesi gibi davranmaya başlamış, bu da likit limit değerini azaltmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç katkı malzemelerinin yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir. En ideal karışım %15 Afşin-Elbistan uçucu külü ile %6 kireç katkısında elde edilmiştir.

5. SİMGELER

ASTM	American society for testing and materials
A.Za	Ateş zayıtı
CH	Yüksek plastisiteli kil zemin
UK	Afşin-Elbistan termik santral uçucu külü
K	Kireç
PI	Plastisite indisi değeri
Ps	Sabit hacimli şişme basıncı
WL	Likit limit değeri
WP	Plastik limit değeri
ω_{opt}	Optimum su muhtevası
qu	Serbest basınç mukavemeti
γ_k	Kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
ω	Su muhtevası
σ	Eksenel gerilme
ϵ	Eksenel şekil değiştirme
Ps	Şişme basıncı

TEŞEKKÜR

FYL-2020-7401 no'lu proje kapsamında maddi destekte bulunan Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Açaz, A., 2011. Magnezyum Klorür Solüsyonunun Problemlili Kil Zeminin Şişme, Dispersibilite ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 154s, Eskişehir.
- ASTM D 4546-90, 1993. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Percent of Cohesive Soils. ASTM, USA.
- ASTM D 698-07 E1, 2009. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM, USA.
- ASTM D 4318-05, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM, USA.
- ASTM D 2166 / D2166M-13, 2013. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, USA.
- Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar, A., 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construction and Building Materials, 19(6), 448-453.
- Baykal, G., Erdinçliler, A., Saygılı, A., 2004. Highway Embankment Construction Using Fly Ash In Cold Regions, Resources. Conservation and Recycling, 42(3), 209-222.

- Bilgen, G. 2011., Öğütülmüş Çelikhane Cürufu, Kireç ve Deniz Suyunun Killerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 278s. Kocaeli.
- Bhardwaj, A. and Sharma, R.K. 2020. Effect of industrial wastes and lime on strength characteristics of clayey soil, Journal of Engineering, Design and Technology, 18(6), 1749-1772.
- Civelekoğlu, B., 2009. Şişebilen Killi Zeminlerin Doğal Jips Katkısı Kullanılarak İyileştirilmesi. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53 s. Sivas.
- Cömert, A., 2005. Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonuna Etkileri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, Sakarya.
- Çalık, Ü., 2012. Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 159s. Trabzon.
- Çetin, A., 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 121 s. İstanbul.
- Çokca, E., Yılmaz, Z., 2004. Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. Waste Management, 24(2), 153-164.
- Çimen, Ö., Günaydın, H.İ., Keskin, S., 2017. Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının Etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 250-253.
- Dereli, B., 2013. Bor Ve Amorf Silikanın Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62 s. Isparta.
- Erdoğan, T., 1993. Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanımı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, 1-8s. Ankara.
- Eroğlu, H., 2003. Orman Yollarında Kağıt Fabrikası Atığının (Kireç Çamuru) Stabilizasyon Amaçlı Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 172s. Trabzon.
- Gencer, G., 2018. Biyopolimer İle Etkileştirilmiş Kil/Pomza Tozu Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s. Erzurum.
- Güçek, S., 2011. Mermer Tozu Ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 86s. Afyon.
- Holtz, R., Kovacs, W., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. New Jersey, USA. Prentice Hall Inc.
- Kalay, E. 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Sstabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu Ve Kirecin Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 54s. Isparta.
- Kalem, Z., 2015. Kentsel Dönüşümdeki İnşaat Ve Yıkıntı Atıklarının Killi Zeminlerde İyileştirmeye Etkilerinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s. Sakarya.
- Kılıç, G., 2008. Çimento İle Zemin Stabilizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, 102s. İstanbul.
- Mahmoudi Moghaddam, M., 2011. Elektrik Ark Fırını (EAF) Cürufu Katkısının Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s. İzmir.
- Oweiss, I., Bowman, J., 1981. Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division., (107).
- Öksüz, K., 2006. Afşin – Elbistan Termik Santral Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Adana.
- Özaydın, K., 2011. Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, 350s. İstanbul.
- Pekdemir, Y., 2013. Silis Dumani, Kırmızı Çamur Ve Kireç İle Muamele Edilmiş Mikronize Bir Kilin Bazı Geoteknik Özelliklerinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s. Erzurum.
- Şenol, A., Edil, T., Bin-Shafique, M., H.A., Benson, C. H., 2006. Soft subgrades stabilization by using various fly ashes. Resources, Conservation and Recycling, 46(4), 365-376.

Taşçı, G., 2011. Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Eskişehir.

Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği / AR-GE/ Y 98.3.

Türkel, U. 2019. Bazalt Fiber Ve Çimento Katkısının Zayıf Zeminlerin Geoteknik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 94s. Düzce.

Türköz, M., Savaş, H., Tasci, G. 2018. The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil

showing both swelling and dispersive features. Arab J Geosci., 11(735).

Yeşilççek, H., 2016. Kolemitin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110s. Trabzon.

Yıldız, A., 2008. Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 172s. Isparta.

Yılmaz, F., 2015. Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler Ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği İle Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 181s. Trabzon.