

Çimento, kireç ve uçucu kül ile iyileştirilen kaolin bentonit karışımı zeminlerin mekanik özellikleri

Tuğba ESKİŞAR*

Ege Üniversitesi, Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

Geliş Tarihi (Received Date): 08.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 10.07.2019

Öz

Bu çalışmada çimento, kireç ve uçucu kül ile yapılan iyileştirmenin kil zeminlerin mukavemet ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kaolin-bentonit karışımı bir zemine çimento, kireç ve bu bağlayıcılara puzolan olarak uçucu kül katılarak hazırlanan numuneler farklı kür sürelerinde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile dayanımları tespit edilmiş, katkı maddelerinin ve kür sürelerinin mekanik davranışa olan etkisi araştırılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında Harvard minyatür kompaktörü kullanılmıştır. Katkı içermeyen zemine göre katkı maddeleri ile iyileştirilmiş zeminlerin çok daha gevrek bir davranış sergilediği ve göçme anındaki deformasyonlarının küçüldüğü gözlenmiştir. Kür süresinin artması da deformasyon seviyesinin azalmasına sebep olmuştur. %6 kireç-%3 uçucu kül içeren numuneler en yüksek mukavemeti vermiştir. Katkısız örneklere göre dayanım 180 gün sonunda 6.6 kat artmıştır. Kireç-uçucu kül katkısının çimentonun yerini alabilecek yüksek mukavemet ve daha düşük maliyetle bir alternatif oluşturabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kaolin, bentonit, serbest basınç mukavemeti.

Mechanical properties of kaolin-bentonite mixture soils treated with cement, lime and fly ash

Abstract

The present study examines the strength and deformation properties of clay soils stabilized with cement, fly ash and lime. For this reason, clay soil that consisted of kaolin and bentonite was constituted and this soil was admixed with cement and lime. Also, fly ash was used as a pozzolan with these additives. Different curing periods were

* Tuğba ESKİŞAR, tugba.eskisar@ege.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-0269-2149>

applied and unconfined compressive testing was performed to investigate the effects of additives and curing times on the mechanical behavior of clay soils. Harvard miniature compactor was used to prepare the specimens. The treated specimens showed a brittle behavior compared to the untreated soil specimens and the deformations were much smaller. Deformations were also decreased due to the increment of curing times. Highest unconfined compressive strength was achieved in specimens with 6% lime-3% fly ash combination. The compressive strength of treated specimens were 6.6 times greater than the compressive strength of untreated specimens at the end of 180 days. Therefore, lime-fly ash additive was able to replace cement additive for stabilization of specimens from the point of mechanical and economical view.

Keywords: Kaolin, bentonite, unconfined compressive strength.

1. Giriş

İnce daneli zeminlerin uygun katkıları ile stabilizasyonu yol inşaatı, dolgu yapımı, sıg temel tabakası iyileştirmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve performansını artırmak stabilizasyonun uzun dönemdeki başarısına bağlı olmaktadır. Çimento ve kireç gibi katkıları sıklıkla tercih edilmektedir. Hidratasyon bileşenleri ve kil minerallerinin varlığı zemin yapısında güçlü bağların kurulmasına olanak sağlamaktadır [1]. Şişebilen özellikte veya marjinal zeminlerin de stabilizasyonunda çimento ve kireç kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir [2-5]. Atık bir malzeme olan uçucu kül ise çimento veya kireç ile birlikte kullanıldığında dayanımı olumlu yönde geliştirmektedir. Aynı zamanda maliyetleri düşüren daha ekonomik çözümler üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Zemin özellikleri bölgeden bölgeye değişiklik gösterdiği için sahaya özgü stabilizasyon uygulamaları yapılmalı, deneylerle geoteknik özelliklerin değişimi incelenmeli, daha sonra uygulanacak metodun etkinliği ve başarısı sahada takip edilmelidir.

Çimento ile stabilize edilen zeminin özelliklerinin gelişmesi, zemin çimento matrisinde birincil ve ikincil çimentolanmış partiküller oluşturan kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Birincil çimentolanmış partiküller hidrasyon reaksiyonu ile meydana gelir ve hidratlanmış kalsiyum silikatlar, kalsiyum alüminatlar ve hidratlanmış kireçten oluşur. Hidratlanmış kireç ile kil minerallerinden silika ve alümina arasındaki ikincil bir puzolanik reaksiyon, ilave kalsiyum silikat hidratlarının ve kalsiyum alüminat hidratlarının oluşumuna yol açar. Bu zemin çimento etkileşimi stabilizasyon sonucu dayanımdaki gelişmeyi açıklamak için net bir temel sağlar [6].

Kireç ile yapılan stabilizasyonda ise kil partikülleri yüzeyindeki metal iyonları ile kireç içindeki kalsiyum iyonları arasında katyon değişimleri gerçekleşir. Katyon değişimine ek olarak kil minerali kafeslerindeki silika ve alümina arasında da reaksiyonlar meydana gelerek sulu çimentolanmış ürünler ortaya çıkar ve kilin flokülasyonunda artış gerçekleşir. Yüksek derecede alkali olan bu ortamda esas olarak kalsiyum silikatlar ortaya çıkar. Böylesi bir durumda, stabilizasyonun başarısı ortamda kullanılan kireç ile zeminin kil minerali içeriğine bağlıdır [7].

Uçucu kül, termik santrallerinin bir yan ürünüdür ve silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi farklı mineral bileşikler içerir. Stabilizasyonda kullanılan çimento miktarını azaltarak bunun yerine uçucu kül

kullanmak karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Özellikle, uçucu kül gibi atık yan ürünlerin puzolanik etkisinin çevre dostu ve sürdürülebilir çözümlere olanak sağlayacağı düşünülmektedir [1]. Uçucu küller genel olarak F sınıfı veya C sınıfı olarak ayrılır. F sınıfı uçucu külün C sınıfına göre kalsiyum oksit miktarı biraz daha düşük olup bu durum sadece puzolanik reaksiyonların ortaya çıkmasına neden olur. Bu nedenle çimento veya kireç ile birlikte kullanılmaktadır [8].

Keshawarz ve Dutta [9], % 20 F sınıfı uçucu kül, % 6 kireç ve %10 Portland çimentosu içeren 3 grup zemin örneği üzerinde çalışmıştır. Zeminlerin plastisitesini azaltmada bu üç katkı da başarılı bulunmuştur. Serbest basınç mukavemetleri tüm örneklerde artmış ve mukavemet yüksekten düşüğe doğru sırasıyla, çimento, kireç ve uçucu kül içeren gruplarda gözlenmiştir. Bell [7], killi zeminlere kuru ağırlıkça % 1-3 oranında kireç katılmasının mühendislik özelliklerini geliştirdiğini, ancak bu miktarın üzerinde kireç eklendiğinde kıvam limitlerinin değişmeyip sadece mukavemetin arttığını belirtmiştir. Erdal [10], C sınıfı uçucu kül, kireç ve çimentonun şişebilen zeminler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu zeminlere,% 20 uçucu kül katılması ile gözlenen şişme potansiyeli ile % 8'lik bir kireç ilavesiyle elde edilen şişme potansiyeli ile neredeyse aynı olduğunu göstermiştir. % 20 ila % 25 uçucu kül ilavesiyle, şişme potansiyelinde sadece hafif bir düşüş gözlenmiş, bu da optimum uçucu kül içeriğinin % 20 civarında olduğu şeklinde bulunmuştur. Cömert [11], araştırmasında yüksek kaolin içerikli kil bir zemin kullanmıştır. Bu kil içerisine % 5 kireç ve değişik oranlarda uçucu kül katmış ve bu karışımlara değişik sürelerde kür uygulamıştır. Karışımların 28 günlük kür sonucunda kıvam limitlerine göre katkı oranları arttıkça plastisite indislerinin azaldığını gözlemlemiştir. Uçucu külün kaolin içeriği fazla zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Sariosseri ve Muhunthan [12] çimento katkılı farklı türde zeminler ile yaptıkları çalışma neticesinde işlenebilirlikte, serbest basınç mukavemetinde ve kayma mukavemetinde gelişim görmüşlerdir. İyileşmenin zeminin türü ile yakından ilgili olduğunu söylemişlerdir. Drenajsız üç eksenli deneylerde kayma mukavemeti gelişimi ile birlikte meydana gelen kırılma türlerinin de çimento içeriğiyle değişim gösterdiğini bulmuşlardır. Khemissa ve Mahamedi [5] aşırı konsolide şişebilen bir kil zeminde çimento ve kireç ile stabilizasyon yaparak, kompaksiyon, CBR ve drenajsız direkt kesme deneyleri yapmışlardır. Doğal kilin taşıma gücünün %8 çimento ve %4 kireç katkısıyla sağlandığını raporlamışlardır. Ünver [13], yaptığı çalışmada dispersif ve şişme özelliklerine sahip düşük plastisiteli kil zemine kuru ağırlığının farklı oranlarında Çatalağzı ve Soma uçucu külü ilave edilerek geoteknik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Katkı ilave edilen numunelerde katkı oranının artmasıyla beraber şişme yüzdesinde belirgin bir şekilde azalmanın ortaya çıktığını gözlemlemiştir. Sonuçta iki katkı maddesi de şişme yüzdesi değerlerini azaltmıştır. Soma uçucu külünün Çatalağzı uçucu külüne oranla zeminin şişme ve dayanım özelliğine daha olumlu yönde etki yaptığı belirlenmiştir. Farklı katkı seviyelerinde serbest basınç deney sonuçları incelediğinde; artan katkı oranıyla birlikte dayanımın arttığı; Soma uçucu külü için artan katkı oranlarında %20 katkı oranından sonra Çatalağzı uçucu külünde ise genel olarak dayanımda artış gözlemleyememiştir. Baldovino vd. [14], killi zeminlere değişen oranlarda kireç katkısının kür sürelerine bağlı olarak değişimini araştırmışlardır. Yarmada çekme ve serbest basınç deneylerinden mukavemetlerin oranlarını hesaplamışlar ve bu değerler kür süresine bağlı olarak 0.17 - 0.2 arasında değiştiğini, kireçle stabilize edilen zeminlerin kireç eklenmemiş zeminlerin 4 katı serbest basınç mukavemetine ulaştığını belirtmişlerdir. Sharma vd. [15] killi bir dağ zeminini kireç ve çimento ile stabilize etmişlerdir. Çimento katılmasının kireç stabilizasyonuna göre zeminin mekanik davranışı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade

etmişlerdir. 28 günlük örneklerin basınç mukavemetleri işlem görmemiş zeminlerin 6 katına ulaşmıştır. Kür süresinin çok önemli bir faktör olduğunu vurgulamışlardır. %5 çimento veya kireç ilavesinin yeterli mukavemete ulaşmayı sağladığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada kil zemine çimento, sönmemiş kireç ve bu malzemelerle birlikte F sınıfı uçucu külün belirli oranlarda katılması sonucu bir iyileştirme çalışması yapıldığında, zemin karışımlarının mukavemet gelişimleri, gerilme ve deformasyon davranışları katkı türü ve katkı miktarına göre planlanan deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Bu amaçla her örnek grubundan en az 3 adet olmak üzere, sonuçların kontrolünü de içeren ek örneklerle birlikte 201 adet örnek, 12 farklı karışım oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Karışımlarda dikkate alınan bir diğer değişken de kür süreleri olmuştur. Örnekler 14, 28, 90, 150 ve 180 gün kür sürelerinde bekletildikten sonra serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Zemin özelliklerindeki gelişmeler, katkı türü ve miktarına bağlı olarak detaylı bir şekilde tartışılmış ve bulgular literatür ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

Kaolin ve bentonit %70-%30 oranında karıştırılarak elde edilen ince daneli zemin kullanılmıştır. ASTM D4318 [16] standardına uygun olarak Casagrande yöntemi ile likit limit ve plastik limit belirlenmiştir. Likit limiti (LL) 80 ve plastik limiti (PL) 35 bulunan %70 kaolin-%30 bentonit karışımı kil örneğinin plastisite indisi: $PI=80-35=45(\%)$ olarak hesaplanmıştır. %70 kaolin-%30 bentonit karışımı örneğin zemin sembolünün tespiti ASTM D2487 [17]'ye uygun olarak yapılmış olup yüksek plastisiteli kili tarif eden CH olduğu tespit edilmiştir. Özgül ağırlık deneyi ise ASTM D854 [18] standardına göre yapılmıştır. Zeminin özgül ağırlığı 2.6'dır.

Kullanılan çimentonun tipi CEM I 42.5 R olup Bolu'da üretilmiştir. Çimentonun kimyasal bileşenleri, %62.65 CaO, %19.54 SiO₂, %4.80 Al₂O₃, %5.71 Fe₂O₃, %1.89 MgO, %3.12 SO₃, %0.37 Na₂O, %0.40 K₂O ve diğer minör bileşenler şeklindedir. Yoğunluğu 30.7 kN/m³'tür.

F sınıfı uçucu kül, Çayırhan Termik Santrali'nden temin edilmiş olup dayanım aktivite indeksi 7. günde %78, 28. günde ise %84 olarak belirlenmiştir. Kimyasal bileşenleri, %15.94 CaO, %47.07 SiO₂, %11.56 Al₂O₃, %7.22 Fe₂O₃, %7.77 MgO, %2.78 SO₃, %1.59 Na₂O, %3.04 K₂O ve diğer minör bileşenler şeklindedir. Yoğunluğu 25.0 kN/m³'tür.

Kireç sönmemiş formda olup Tokat'ın Niksar yöresinden elde edilmiştir. %90'ı CaO olup yoğunluğu 30.9 kN/m³'tür.

2.2. Yöntem

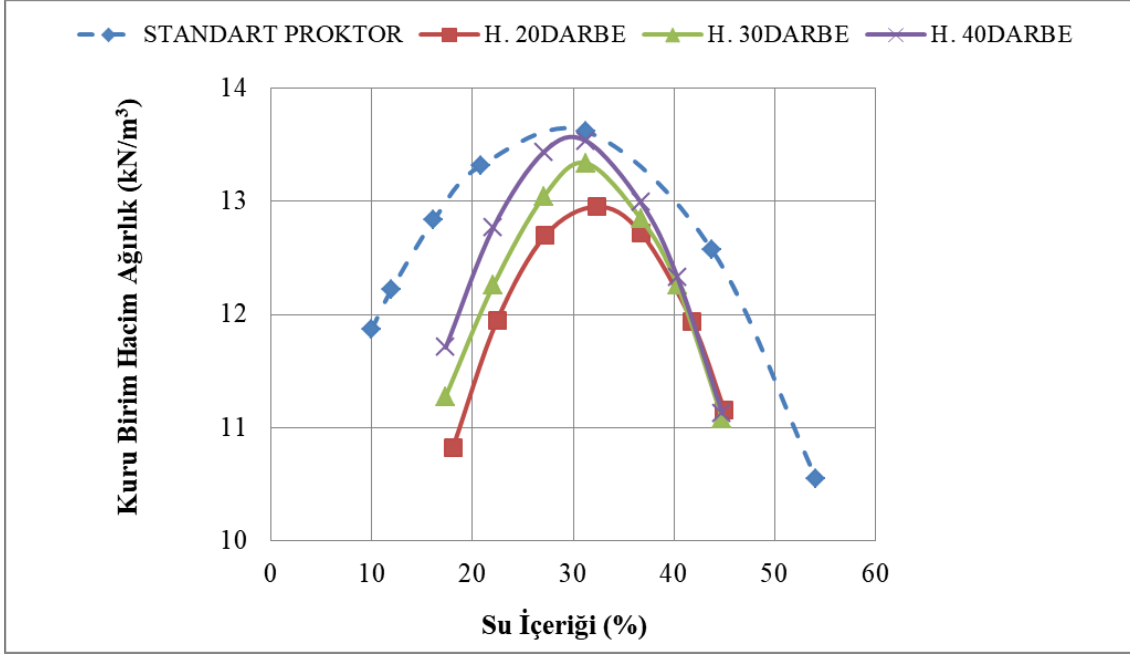
Bentonit havadaki nem sebebiyle su içeriği artışı gösterebileceği için önlem olarak hem kaolin hem de bentonit kullanılmadan önce 24 saat etüvde bekletilmiştir. Kaolin ve bentonit karışımı bu kuru karışımların ağırlıkça oranları ile hazırlanmıştır. Bu çalışmada serbest basınç deneyinde kullanılmak üzere çapı 50 mm yüksekliği 100 mm olan silindirik örneklerden farklı içeriklere sahip olacak şekilde ve her örnek grubundan en az 3 adet içerecek şekilde 201 adet hazırlanmıştır. Çalışmaya ait deney programı ve hazırlanan örnek gruplarına ait örnek adetleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada C

çimento, L kireç, FA uçucu kül, için kullanılan kodlama olup, bu harflerin yanındaki sayılar o katkının kuru ağırlıkça eklenen yüzdesini ifade etmektedir. D ise kür süresini gün cinsinden ifade eder.

Tablo 1. Çalışmaya ait deney programı.

Örnek Adı	Grup No.	L	C	FA	Kür süresi, D'ye (gün) göre örnek adetleri					Grup toplamı	
		%	%	%	0	14	28	90	150		180
Zemin	Kontrol Grubu	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3
C3	1	-	3	-	-	3	4	4	3	3	17
C6	2	-	6	-	-	3	4	3	3	3	16
C9	3	-	9	-	-	3	4	3	3	3	16
C3FA3	4	-	3	3	-	3	4	4	3	3	17
C3FA6	5	-	3	6	-	3	4	4	3	3	17
C6FA3	6	-	6	3	-	3	4	3	3	3	16
L3	7	3	-	-	-	3	4	4	3	3	17
L6	8	6	-	-	-	3	4	3	3	3	16
L9	9	9	-	-	-	3	4	3	3	3	16
L3FA3	10	3	-	3	-	3	4	4	3	3	17
L3FA6	11	3	-	6	-	3	4	4	3	3	17
L6FA3	12	6	-	3	-	3	4	3	3	3	16
Genel Toplam											201

Öncelikle standart Proktor kompaksiyon deneyi (ASTM D698 [19]) ile maksimum kuru birim hacim ağırlık – optimum su içeriği belirlenmiştir. Bu eğri incelendiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlığın 13.63 kN/m^3 , optimum su içeriğinin de %30 olduğu görülmektedir (Şekil 1). CH türü zeminlerde kompaksiyon düşünüldüğünde sahada ilk seçenek keçi ayaklı silindir olmaktadır. Bu düşünceden hareketle çalışmada, keçi ayaklı silindirin yoğurma hareketini en iyi betimleyen Harvard kompaktörü ile çalışılmıştır [20]. Kompaksiyon enerjisi, sıkıştırılan zeminin mekanik özelliklerini etkileyen etmenlerden birisidir ancak Harvard metodu ile sıkıştırma yapıldığında direkt olarak hesaplanması mümkün değildir. Bu sebeple öncelikle standart Proktor deneyi yapılarak referans bir kompaksiyon eğrisi elde edilir. Daha sonra deneme-yanılma metodu ile farklı darbe ve tabaka sayılarında deney Harvard kompaktörü ile tekrarlanır ve standart Proktor deneyi ile ulaşılan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasına mümkün olduğunca yaklaşılmaya gayret edilir [21]. Bu çalışmada 5 tabakada 20 darbe, 30 darbe ve 40 darbe ile sıkıştırılan silindirik numunelerinin kuru birim hacim ağırlık-su içeriği grafikleri çizilmiştir. Şekil 1’de referans eğriye en yakın kompaksiyon eğrisinin 40 darbe ile elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple örneklerin hazırlanmasında her tabakada 40 darbe uygulanmıştır.



Şekil 1. Harvard kompaksiyon eğrilerinin referans eğri ile karşılaştırılması (H.: Harvard kompaksiyon deneyi).

Kaolin ve bentonit karışımı zemine kuru ağırlıkça %3, 6 ve 9 oranlarında çimento ve kireç, uçucu kül içeren örneklerde ise toplam yüzdenin %9'u geçmeyecek şekilde çimento veya kireç malzemelerine ek olarak yine kuru ağırlıkça %3 veya %6 oranlarında F sınıfı uçucu kül kullanılarak stabilize edilmiştir.

Örnekler 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindir şeklinde hazırlanmıştır, sıkıştırma sırasında optimum su içeriklerinde çalışılmıştır. Kür süresini tamamlayan örnekler, ASTM D2166 [22] standardına uygun olacak şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

3. Deney sonuçları ve tartışma

Bu bölümde, örneklerin gerilme-şekil değiştirme davranışları, kür süresi, katkı türü, katkı miktarı değişimlerine bağlı olarak saptanan bulgular ele alınacaktır. Bulgular çalışma programında belirtildiği üzere (Tablo 1) 3 veya 4 adet örneğin ortalama dayanımları bulunarak örnek gruplarını temsil eden serbest basınç mukavemeti (SBM) dikkate alınarak sunulmuştur. Bir örnek grubunun serbest basınç mukavemeti hesaplanırken, ortalama mutlak hata yüzdesi kontrolü yapılmış, %10'dan fazla hata veren örnekler çalışmanın dışında bırakılmıştır. Bu sebeple 201 örneğin verisi ile çalışılmıştır. Tablo 2'de her bir örnek grubuna ait ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri sunulmaktadır.

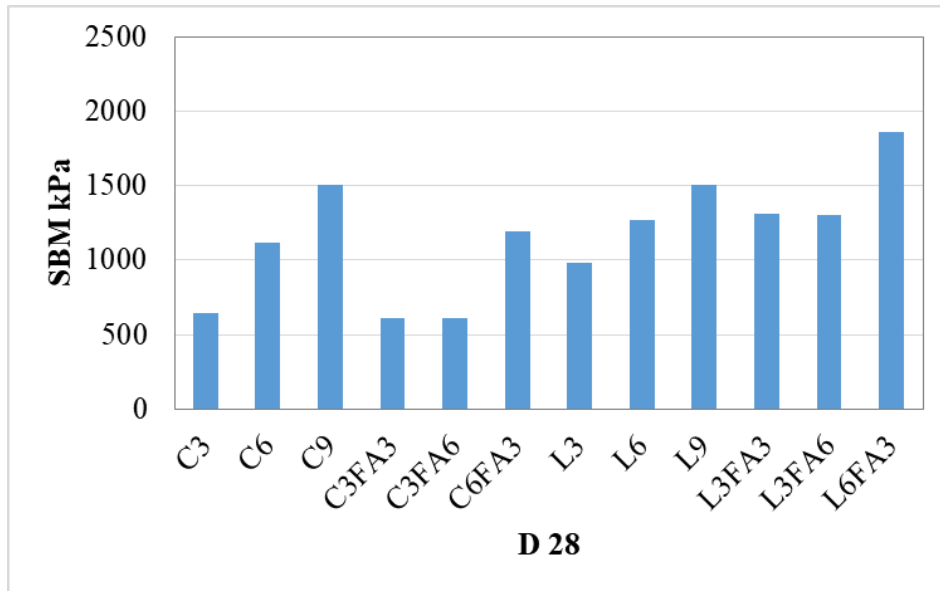
Tablo 2. Örnek gruplarının kür süresine göre sıralanmış serbest basınç mukavemetleri.

	Örnek Grubu	D (Gün)					
		0	14	28	90	150	180
SBM (kPa)	Zemin	376	-	-	-	-	-
	C3	-	527	645	662	669	877
	C6	-	668	1118	1164	1406	1479
	C9	-	1484	1505	1670	2074	2192
	C3FA3	-	550	608	661	732	937
	C3FA6	-	588	610	861	874	911
	C6FA3	-	1086	1192	1270	1308	1558
	L3	-	822	983	1049	1285	1292
	L6	-	1096	1271	1350	1438	1491
	L9	-	1215	1504	1651	1691	2017
	L3FA3	-	1067	1305	1410	1632	1849
	L3FA6	-	1266	1305	1359	1486	1884
	L6FA3	-	1581	1858	1988	2252	2492

3.1. Katkı Miktarının Etkisi

Şekil 2, 28 gün sonunda serbest basınç deneyinde ölçülen serbest basınç mukavemetini (kısaca SBM olarak adlandırılmıştır) göstermektedir. Katkısız zemin örneklerinin ortalama dayanımı 376 kPa'dır. Çimento katkılı zeminlerde katkı miktarının artması ile SBM artmıştır. %9 çimento (C9) içeren örneklerin SBM en yüksektir. %3 çimento (C3) ile hazırlanan örneklerin yaklaşık 2.3 katına ulaşmıştır. Uddin vd. [23] CH türü kilde yaptıkları bir incelemede %5 ve %10 çimento katkılı örnekler hazırlamışlardır. %5 çimento ilavesinin yeterli olmadığını, yüksek dayanım için %10 çimento ilavesinin gerekli olduğunu yazmışlardır. LL=103 ve PL= 43 olan kilde 28 gün sonunda 300kPa dayanım elde edilmiştir. Bu çalışmayla karşılaştırıldığında daha düşük dayanımların görülme sebebi likit ve plastik limit değerlerinin yüksek olmasından ileri gelmiştir. Zentar vd. [24] ise LL=76 ve PL=35 olan denizel bir kile %3, 6, 9 oranlarında çimento ve toplam %9'u geçmeyecek şekilde çimentoya ilave %3 ve %6 siliko alüminalı uçucu kül katmıştır. Örneklerin optimum su içeriği %20'dir ve 90 gün sonunda 3600 kPa dayanım bulmuşlardır. Zentar vd.'nin [24] çalışmasında optimum su içeriğinin daha düşük olduğu görülmektedir ve daha yüksek performans gösteren bir uçucu kül ile çalışmışlardır. Bu çalışmada ise yüksek kireçli kalsiyumlu uçucu kül kullanılmıştır ve optimum su içeriği daha yüksektir. Dolayısıyla, 90 gün sonunda 1670 kPa dayanım elde edilmiştir. Pakbaz ve Alipour [25], %30 su içeriğindeki CL türü bir zemine %4, 6, 8, 10 oranlarında çimento eklediklerinde en yüksek dayanımı sırası ile %10 ve %8 çimento içeren örneklerde bulmuşlardır. 28 gün sonunda 3000 kPa'ya yaklaşan dayanımlar elde etmişlerdir. Bu çalışma ile Pakbaz ve Alipour'un [25] çalışmasının karşılaştırması yapıldığında aynı su içeriklerinde olsa dahi kil zeminin plastisitesinin serbest basıncı değiştiren önemli bir faktör olduğu, plastisitenin azalması ile serbest basınç mukavemetinin artabileceği ortaya çıkmaktadır. Kireç katkılı zeminlerde %3'lük (L3) bir ilave, %3 çimento (C3) ile sağlanan artıştan daha büyük olmuştur. Consoli vd.'de [26] kil zeminlerde en az %3 kireç kullanılmasının gerekli olduğunu ve kireç miktarı arttıkça dayanımların da artacağını raporlamıştır. Kireç ile stabilize edilen örneklerde katkı miktarı arttıkça ortaya çıkan mukavemet artışı farkı daha küçük

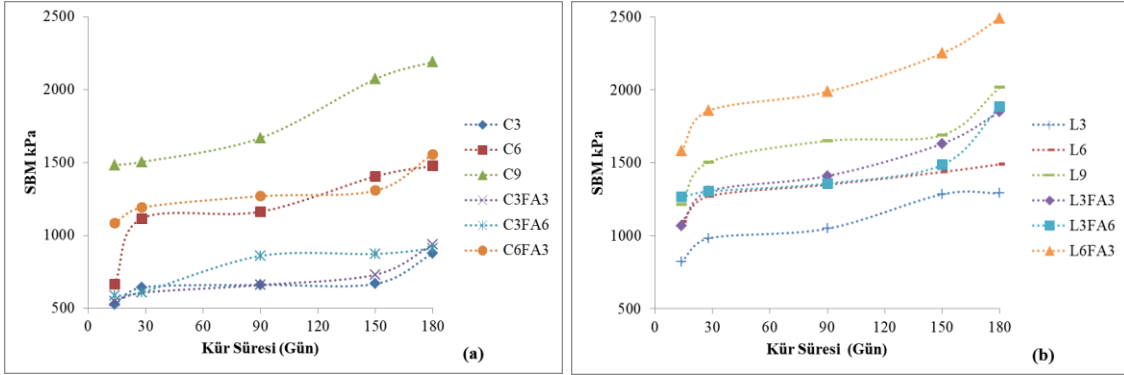
olmakla beraber, %9 kireç katkısı (L9) ile %9 çimento (C9) katkılı zeminlerin SBM'si arasında yakın değerler elde edilmiştir. Bu bulgu ile tutarlı olarak, Yunus vd. [27], %3, %6, %9 kireç ekledikleri denizel kilde %9 kireç katkılı örneklerin en yüksek dayanımı verdiğini bulmuşlar ve kür süresini uzatmanın kireç katkılı zeminlerin dayanımını arttırmaya yardımcı olacağını öngörmüşlerdir. Uçucu kül ile çimento veya kireç kullanıldığında ise C3FA3 ve C3FA6 örnekleri C3 örneklerine yakın SBM vermiştir. Bu durumda uçucu külün önemli bir etkisi görülemedi. Bu da ortamda çimentonun bulunması ile meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu mikroyapı değişirken uçucu külün kullanılmasına olanak sağlayacak reaksiyonların oluşmadığı şeklinde yorumlanmıştır. Benzer şekilde, Zentar vd. [24] %3 çimento-%3 uçucu kül, %3 çimento-%6 uçucu kül, %6 çimento-%3 uçucu kül katkılı kil örneklerin mukavemetini sadece %3 ve %6 çimento katkılı örneklerle kıyasladıklarında 28 gün sonunda dayanımların azaldığını ve uçucu kül zemini zayıf hale getirdiğini belirtmişlerdir. Tablo 2 incelendiğinde bu çalışmada da C3FA3 ve C3FA6 örneklerinde 28 günde dayanım C3 örneklerinin ortalama dayanımının altında kalmıştır. L3FA3 ve L3FA6 örnekleri de L6 örneklerine yakın mukavemet seviyelerine ulaşmıştır. Bu durumda çimento yerine kirecin tercih edilmesi uçucu külün etkinliğini az miktarda artırmaktadır. Wang vd. [28] F sınıfı uçucu kül-çimento ve F sınıfı uçucu kül-kireç katkılı örneklerinin dayanımlarını incelediğinde kireç ve uçucu kül içeren örneklerin dayanımının daha yüksek olduğunu bulmuştur. Bu durum uçucu kül ile çimento/kireç arasında farklı kimyasal reaksiyonların oluşmasından ileri gelmektedir. Uçucu külün puzolanik aktivitesi kireç ve su bulunduğunda etkin olmakta ve bağlayıcı jel oluşumunu sağlamaktadır. Bu da dayanımı arttırmaktadır. Uygulamada daha az kireç ve atık bir madde olan uçucu kül kullanılarak belirli dayanım seviyelerine ulaşmanın mümkün olduğu gözlenmiştir. Öyleki, en yüksek SBM, L6FA3 örneklerinde elde edilmiş ve sadece kireç kullanılan L9 örneklerini geçmiştir.



Şekil 2. 28 günlük (D 28) çimento (C), kireç (L), çimento-uçucu kül (C-FA), kireç-uçucu kül (L-FA) katkılı örneklerin serbest basınç mukavemetleri (SBM) (İndislerin yanındaki rakamlar kuru ağırlıkça yüzde cinsinden kullanılan katkı miktarını göstermektedir).

3.2. Kür süresinin etkisi

Zemin stabilizasyonu yapılan örneklerin farklı kür sürelerinde dayanımının nasıl değiştiğinin bilinmesi, uygulama tamamlandıktan ne kadar sonra projede beklenen dayanımlara ulaşılabileceğinin bilinmesi açısından önem taşır. Ayrıca yapının servis ömrü de dikkate alındığında uzun dönem dayanımların değeri bilinmelidir. Literatürün genel olarak 90 güne kadar olan kür sürelerinde gözlenen SBM ile sınırlı kaldığı görülmektedir [1, 5, 14, 29-31]. Bu çalışmada ise uzun dönem olarak 150 ve 180 güne kadar olan SBM'ler de incelenmiştir.



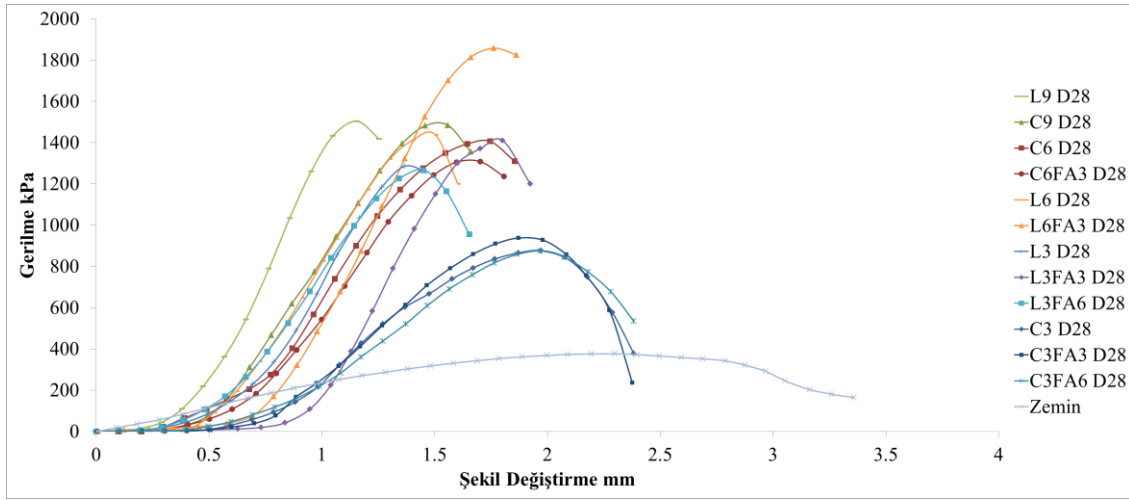
Şekil 3. 14, 28, 90, 150 ve 180 gün sonunda (a) çimento (b) kireç katkılı örneklerin serbest basınç mukavemetleri.

Şekil 3 incelendiğinde C6, C6FA3 ve C9 örneklerinin 180 günde SBM başlangıç değerlerinin oldukça üzerinde olduğunu, ancak C6 ile C6FA3 kıyaslandığında SBM değerlerinin 14 gün haricinde yakın olduğu gözlenmiştir. Bu da çimento katkılı durumda uçucu kül etkinliğinin fazla olmadığı kanısını oluşturmaktadır. En yüksek uçucu kül yüzdesine sahip C3FA6 örnekleri de bu bulguyu destekler niteliktedir. Lilley de [32] kohezyonlu zeminlere uçucu kül eklenmesinin faydalı olmadığını söylemiştir. Sasanian ve Newson [33] çimento katkılı örneklerin dayanımının çok uzun süre artmaya devam ettiğini tespit etmiştir. Bu durum kil mineralleri ile çimentolanma ürünleri arasında devam eden yavaş puzolanik reaksiyonlar sebebiyle olmaktadır. Kireç katkılı örneklerde ise L3FA3 ve L3FA6 örneklerinin kür süresi boyunca SBM değerleri L6 ve L9 örneklerinin arasında kalmıştır. Kireç ile uçucu kül birlikte daha etkin bir mekanizma oluşturmuştur. Uçucu kül içeren örnekler 180 gün sonunda yakın mukavemet değerlerine ulaşmaktadır. Ancak, literatürde raporlanan 90 güne kadar yapılan mukavemet ölçümlerinin özellikle kil minerallerince baskın olan ortamlarda mukavemet değerlerinin sabit bir doygunluğa ulaşması için yeterli olmadığını göstermektedir. Örneğin C9 örneklerinde SBM 90 günden 180 güne %25 artmıştır. Kalantari ve Prasad [34] turba zeminler üzerinde yaptıkları çimento katkılı çalışmalarında hava kurusu, standart kütleme ve sürşarj yük altında standart kütleme tekniklerinin hepsinde örneklerin SBM değerlerinin 90 günden 180 güne doğru artış gösterdiğini bulmuşlardır. Zhao vd. [35] 90 günden itibaren halen hidrasyon ürünlerinin oluşumunun devam ettiğini, Taylor [36] ise 180 günden sonra olgunlaşmış hidrasyon ürünlerinin gözlemlendiğini belirterek bu durumu hidrasyonun geç evresi olarak tanımlamaktadır.

3.3. Katkı türünün etkisi

Kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin çimento ile stabilize edilmiş zeminlere göre en yüksek dayanıma karşılık gelen birim şekil değiştirme miktarları daha az olmuştur

(Şekil 4). L9 örnekleri en yüksek dayanımda % 1.15 birim şekil değiştirme göstermiştir. Oysa, katkısız zeminin birim şekil değiştirme miktarı % 2.3'tür. Kireç veya çimento oranının en yüksek olduğu % 9 katkı içeren zeminler (C9 ve L9) oldukça gevrek bir davranış göstermektedir (Şekil 5). Sariosseiri ve Muhunthan [37] da katkısız zeminlere kıyasla çimento katkılı zeminlerin çok daha gevrek bir davranış gösterdiğini belirtmiştir. Kireç ile birlikte uçucu kül kullanıldığında dayanım artışı ile birlikte gerilme-şekil değiştirme eğrileri de daha sünek bir hal almaktadır. Katkılı örnek grupları içinde en sünek eğriler C3 ile C3FA3, C3FA6 örneklerinde gözlenmiştir. Bu grupların birim şekil değiştirme miktarları sırası ile %1.97, %1.87, %1.97 kadardır. Tüm örnekler birlikte değerlendirildiğinde kireç ile uçucu külün birlikte kullanılması hem gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik bölgesindeki (başlangıçtaki lineer artış gösteren bölge) pekleşme miktarını artırmakta hem de daha yüksek gerilmeler altında daha büyük şekil değiştirmelere ulaşmasına olanak sağlamaktadır. L3, L6, örneklerinin pik mukavemete karşılık gelen birim şekil değiştirme miktarları ile %3 uçucu kül eklenmiş halleri (L3FA3 ve L6 FA3) karşılaştırılırsa sünekliğin artışı görülmektedir. Bu değerler sırası ile L3 ve L3FA3 için, % 1.37 ve %1.80; L6 ve L6FA3 için % 1.50 ve %1.76 kadardır.



Şekil 4. Farklı katkılarla stabilize edilmiş zemin örneklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 5. %9 katkı içeren örneklerde gelişen kırılma yüzeyleri (Soldan sağa sırası ile C9 ve L9 örnekleri).

4. Genel sonuçlar

Çimento, kireç veya bu malzemelere ilave olarak uçucu kül ile stabilize edilen kaolin-bentonit karışımı örneklerin zamana bağlı serbest basınç mukavemeti (SBM) gelişimleri incelenmiştir. Bu amaçla zemine kuru ağırlıkça % 3, 6 ve 9 oranlarında çimento ve kireç, bu katkılara ek olarak yine kuru ağırlıkça % 3 veya % 6 oranlarında F sınıfı uçucu kül katılarak silindirik zemin örnekleri hazırlanmıştır. Yapılan serbest basınç deneyleri ile örneklerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmek mümkün olmuş, pik dayanım değerlerinin ortalaması dikkate alınarak kullanılan katkıların türü, miktarı ve kür süresi gibi etkenlerin örnekler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Uzun dönemdeki etkileri görmek için 180 güne kadar kürleme yapılmıştır.

Deney sonuçları, katkı maddelerinin eklenmesinin katkısız zemine kıyasla faydalı etkileri olduğunu göstermektedir. Katkının türü ve miktarı farklı dayanımlara ulaşılmasını sağlamıştır. Sadece çimento içeren örneklerde %9 çimento içeren C9 örnekleri en yüksek dayanıma ulaşmıştır (2192 kPa). Katkısız zemine göre dayanım 180 gün sonunda 5.8 kat artmıştır. Çimento ve uçucu kül içeren örneklerde ise en yüksek dayanım C6FA3 (%6 çimento-%3 uçucu kül) örneklerinde tespit edilmiş olup (1558 kPa), katkısız zemine göre dayanım 180 gün sonunda 4.1 kat artmıştır. Çimento ve uçucu kül birlikte kullanıldığında, sadece çimento kullanılan örneklerden daha düşük dayanım vermiştir. Kireç ile birlikte uçucu kül kullanılması dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. 180 günün sonunda %9 kireç katkılı L9 örnekleri 2017 kPa dayanıma ulaşmış ve böylece katkısız zemine göre dayanım 5.4 kat artmıştır. Bu çalışmada en uygun karışım %6 kireç ile %3 uçucu kül (L6FA3 örnekleri) kullanıldığında elde edilmiştir. L6FA3 örnekleri ile 180 günlük kür sonunda tüm çalışmada elde edilen en yüksek dayanım olan 2492 kPa'ya (6.6 kat iyileşme) ulaşılmıştır. Örneklerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde katkısız zeminin sünek, % 9 çimento veya kireç katkılı zeminlerin ise gevrek davranış gösterdikleri görülmektedir. Katkı miktarı arttıkça örneklerin pik dayanımlarına karşılık gelen deformasyon miktarları küçülmekte, dolayısıyla katkı miktarı artışı daha gevrek davranışa sebep olmaktadır. Bu çalışmada uçucu kül kireç katkılı örneklerin dayanımını artırmış, ancak çimento katkılı zeminlerin dayanımını azaltmıştır. Little ve Nair [38] katkı seçimine ilişkin geliştirdikleri karar ağacı sınıflandırmasında plastisite indisi 35'ten büyük olan ince daneli zeminler için mutlak suretle kireç / kireç ve uçucu kül kullanılmasını, çimento kullanılması düşünülse dahi kireç ile birlikte uygulanması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada kullanılan zemin örneklerinin başlangıç plastisite indisinin 45 olduğu hatırlanacak olursa, kireç ve uçucu kül stabilizasyonunun en iyi performansı göstermesi de literatür ile uyumludur. Sasanian ve Newson [30] dayanım artışının 3 yıl kadar devam edebileceğini, kil mineralojisi ve aktivitesinin etkin faktörler olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada da 180 güne kadar olan dayanımlar incelendiğinde kullanılan tüm katkılar için dayanımın artışının zamanla devam ettiği görülmüştür. Dayanım değerlerinin doygunluğa ulaşabilmesi için literatürde de belirtildiği gibi daha uzun zamana ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, ekonomik çözümlere ulaşmak için atık bir malzeme olan uçucu kül ile kirecin birlikte kullanılması ile yüksek dayanım elde edilmekte ve kil zeminlerde başarılı uygulamalar yapmak mümkün olacaktır. Bunun dışında sadece çimento veya sadece kireç uygulaması yapılması düşünüldüğü takdirde yüksek katkı oranında çimento katkılı zeminlerin, düşük katkı oranında ise kireç katkılı zeminlerin daha yüksek dayanım verdiğine dikkat edilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Furlan, A. P., Razakamanantsoa, A. Ranaivomanana, H., Levacher, D. ve Katsumi, T., Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash, **Construction and Building Materials**, 184, 454-463, (2018).
- [2] Khabbaz, H. ve Fatahi, B., Chemical stabilization of closed landfill sites using chemical agents. In: Anagnostopoulos, A., et al. (Eds.), **Proceedings of 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, IOS Press, 1777–1782, (2011).
- [3] Louafi, B. ve Bahar, R., Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils, **International Journal of Geosciences**, 3, 719–725, (2012).
- [4] Sharma, N. K., Swain, S. K. ve Sahoo, U. C., Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation, **Geotechnical and Geological Engineering**, 30, 1197–1205, (2012).
- [5] Khemissa, M. ve Mahamedi, A., Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay, **Applied Clay Science**, 95, 104-110, (2014).
- [6] Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M. ve Lee, F.H.: Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 130, 7, 696–706 (2004).
- [7] Bell, F. G., Lime stabilization of clay minerals and soils, **Engineering Geology**, 42, 4, 223-237, (1996).
- [8] Little, D. N., Males, E. H., Prusinski, J. R. ve Stewart, B., Cementitious stabilization, 79th Millennium Report Series, Transportation Research Board, Washington, US, (2000).
- [9] Keshawar, M. S. ve Dutta, U., Stabilization of South Texas soils with fly ash: fly ash for soil improvement, Geotechnical Special Publication No. 36, ASCE, US, (1993).
- [10] Erdal, C., Class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 27, 7, 568–573 (2001).
- [11] Cömert, A. T., Uçucu küllerin zemin stabilizasyonuna etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya (2005).
- [12] Sariosseiri, F. ve Muhunthan, B., Geotechnical properties of Palouse Loess modified with cement kiln dust and Portland cement, **GeoCongress**, New Orleans, Louisiana, United States, 978-0-7844-0972-5, (2008).
- [13] Ünver, E., Problemlili kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2015).
- [14] Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Teixeira, W., Izzo, R. L. S., Rose, J. L., Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 10, 1, 188-194, (2018).
- [15] Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M. ve Singh, T. N., Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study, **Applied Clay Science**, 152, 183-195, (2018)
- [16] ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).

- [17] ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [18] ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).
- [19] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [20] Humboldt Mfg. Co., Harvard Miniature Compaction Apparatus, (2014). https://www.humboldtmfg.com/manuals/H-4165_Harvard_0714.pdf, (28.02.2019).
- [21] D'onofrio, A. ve Penna, A., **Influence of compaction variables on the small strain behaviour of a clayey silt** in Di Benedetto et al. (eds), *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Swets & Zeitlinger, Lisse, 337-344, (2003).
- [22] ASTM D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [23] Uddin, K., Balasubramaniam, A. S. ve Bergado, D. T., Engineering behavior of cement treated Bangkok soft clay, **Geotechnical Engineering Journal**, 28, 1, 89-119, (1997).
- [24] Zentar, R., Wang, D., Abriak, N.E., Benzerzour, M. ve Chen, W., Utilization of siliceous– aluminous fly ash and cement for solidification of marine sediments, **Construction and Building Materials**, 35, 856–863, (2012).
- [25] Pakbaz, M. S. ve Alipour, R., Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay, **Applied Clay Science**, 67–68, 1-4, (2012).
- [26] Consoli, N. C., Lopes L. S. Jr ve Heineck K. S., Key parameters for the strength control of lime stabilized soils, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(5):210–216 (2009).
- [27] Yunus, N. Z. M., Marto, A., Pakir, F., Kasran, K., Azri, M. A., Jamal, S. N. J. ve Abdullah, N., Performance of lime-treated marine clay on strength and compressibility characteristics, **International Journal of Geotechnical and Construction Materials and Environment**, 8, 1, 1232-1238, (2015).
- [28] Wang, D., Abriak, N. E. ve Zentar, R., Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash, **Engineering Geology**, 166, 90-99, (2013).
- [29] Calik, U. ve Sadoglu, E., Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, **Natural Hazards**, 71, 3, 1289-1303, (2014).
- [30] Ghobadi M. H., Abdilor, Y. ve Babazadeh, R., Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters, **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 73, 2, 611-619, (2014).
- [31] Negawo, W. J., Di Emidio, G., Bezuijen, A., Verastegui Flores, R. D. ve François, B., Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 10.1080/19648189.2017.1304272, (2017).
- [32] Lilley, A. A., Soil-cement roads: experiments with fly ash, **Cement and Concrete Association**, Gt. Britain, Technical Report TRA/158 (Oct. 1954).
- [33] Sasanian, S. ve Newson, T. A., Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays, **Soils and Foundations**, 54(2), 209-224, (2014).

- [34] Kalantari, B. ve Prasad, A., A study of the effect of various curing techniques on the strength of stabilized peat, **Transportation Geotechnics**, 1, 3, 119–128, (2014).
- [35] Zhao, H., Zhou, K., Zhao, C., Gong, B. W. ve Liu, J. A long-term investigation on microstructure of cement-stabilized handan clay, **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 20, 199–214.10.1080/19648189.2015.1030087, (2016).
- [36] Taylor, H. F. W., **Cement Chemistry**, Thomas Telford, London. (1997).
- [37] Sariosseiri, F. Ve Muhunthan, B., Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, **Engineering Geology**, 104, 119–125, (2009).
- [38] Little, N. D. ve Nair, S., Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials, National Cooperative Highway Research Program, Texas Transportation Institute, A&M University, Texas, (2009).