



Engineering properties of ultrafine blast furnace slag cement stabilized low plasticity clayey soil

Murat Mollamahmutoğlu¹, Eyübhan Avcı^{2*}, Emre Deveci², Aydın Gökçe¹

¹Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ankara, 06570, Turkey

²Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Science, Department of Civil Engineering, Bursa, 16310, Turkey

Highlights:

- Unconfined compressive strength of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement
- Compressibility properties of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement
- Swelling potential of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement

Graphical/Tabular Abstract

In this study, it was aimed to determine some engineering properties of the low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement (Spinor A6). Firstly, the fundamental geotechnical characteristics of clayey soil specimens stabilized with the contents of 8%, 10% and 12% ultrafine blast furnace slag cement were experimentally ascertained. Then, the compressive strength, compressibility and swelling tests were conducted on the ultrafine blast furnace slag cement stabilized clayey soil specimens that were compacted at the optimum moisture content and maximum dry density. Experimental data showed that after stabilization of low plasticity clayey soil with ultrafine blast furnace slag cement, its strength increased by 9 to 14 times in air dried samples and 9 to 12 times wet-cured samples after 90 days. In addition, at the end of the 90th day, compressibility decreased between 18.3 and 19.2 times in air dried samples and between 17.6 and 18.5 times in wet-cured samples. Finally, it was determined that the swelling potential decreased between 67.5 and 270.0 times in the samples that were kept in the air dried at the end of the 90th day and between 54.0 and 101.2 times in the samples that were kept in the wet-cured samples. Test results showed that the compressive strength of low plasticity clayey soil increased and its compressibility and swelling index decreased with time as ultrafine blast furnace slag cement was added to the soil.

Keywords:

- Spinor A6
- Stabilization
- Clayey soil
- Strength
- Compressibility
- Swelling

Article Info:

Research Article
Received: 04.11.2019
Accepted: 07.12.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.642402

Correspondence:

Author: Eyübhan Avcı
e-mail:
eyubhan.avci@btu.edu.tr
phone:+90 507 465 6336

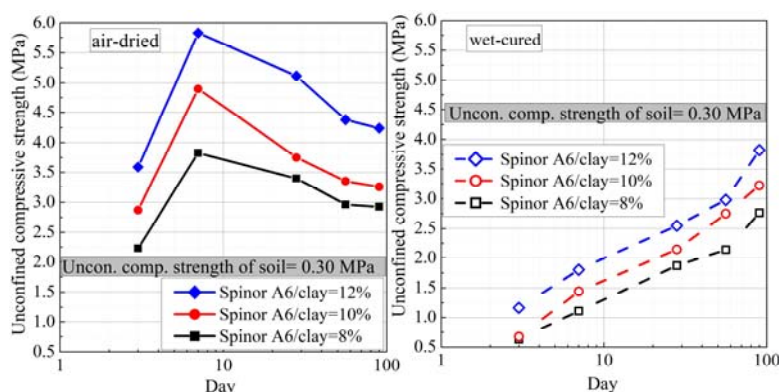


Figure A. Variation of unconfined compressive strength of ultrafine blast furnace slag cement mixed clayey soil with time

Purpose: In this experimental study, stabilization of clayey soils with ultrafine blast furnace slag cement was investigated to improve the effects of some engineering properties such as strength, compressibility and swelling potential. In this way, complementary information is provided in the relevant literature.

Theory and Methods:

8%, 10% and 12% ultrafine blast furnace slag cement was added to the low plasticity clayey soil. Atterberg limit, proctor, unconfined compressive strength, compressibility and swelling tests were performed on clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement.

Results:





With the addition of ultrafine blast furnace slag cement into low plasticity clayey soil, strength values increased and compressibility and swelling percentage values decreased.

Conclusion:

Experimental studies have shown that ultrafine blast furnace slag cement superfine cement is an effective additive in the treatment of low plasticity clayey soils.



Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi zeminin mühendislik özellikleri

Murat Mollamahmutoglu¹ , Eyubhan Avcı^{2*} , Emre Deveci² , Aydın Gökçe¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

²Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli kil zeminin serbest basınç dayanımı
- Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli kil zeminin sıkışabilirlik özelliği
- Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli kil zeminin şişme yüzdesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 04.11.2019
Kabul: 07.12.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.642402

Anahtar Kelimeler:

Spinor A6,
stabilizasyon,
killi zemin,
dayanım,
sıkışabilirlik,
şişme

ÖZET

Bu makalede, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento (Spinor A6) ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi zeminin tek eksenli serbest basınç dayanımı, sıkışabilirlik ve şişme potansiyeli gibi bazı geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, %8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile karıştırılarak elde edilen killi zemin numunelerinin temel geoteknik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Daha sonra, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numuneler üzerinde tek eksenli serbest basınç, sıkışabilirlik ve şişme deneyleri yapılmıştır. Deneysel veriler, düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilme sonrası, 90. gün sonunda dayanımının açık ortamda bekletilen numunelerde 9 ile 14 kat, streçe sarılı halde bekletilmiş numunelerde 9 ile 12 kat arasında arttığını göstermiştir. Ayrıca 90. gün sonunda sıkışabilirliğin açık ortamda bekletilen numunelerde 18,3 ile 19,2 kat arasında, streçe sarılı halde bekletilmiş numunelerde ise 17,6 ile 18,5 kat arasında azaldığı tespit edilmiştir. Son olarak, şişme potansiyelinin ise 90. gün sonunda açık ortamda bekletilen numunelerde 67,5 ile 270,0 kat arasında, streçe sarılı halde bekletilmiş numunelerde ise 54,0 ile 101,2 kat arasında azaldığı belirlenmiştir.

Engineering properties of ultrafine blast furnace slag cement stabilized low plasticity clayey soil

H I G H L I G H T S

- Unconfined compressive strength of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement
- Compressibility properties of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement
- Swelling potential of low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement

Article Info

Research Article
Received: 04.11.2019
Accepted: 07.12.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.642402

Keywords:

Spinor A6,
stabilization,
clayey soil,
strength,
compressibility, swelling

ABSTRACT

In this study, it was aimed to determine some engineering properties of the low plasticity clayey soil stabilized with ultrafine blast furnace slag cement (Spinor A6). Firstly, the fundamental geotechnical characteristics of clayey soil specimens stabilized with the contents of 8%, 10% and 12% ultrafine blast furnace slag cement were experimentally ascertained. Then, the compressive strength, compressibility and swelling tests were conducted on the ultrafine blast furnace slag cement stabilized clayey soil specimens that were compacted at the optimum moisture content and maximum dry density. Experimental data showed that after stabilization of low plasticity clayey soil with ultrafine blast furnace slag cement, its strength increased by 9 to 14 times in air dried samples and 9 to 12 times wet-cured samples after 90 days. In addition, at the end of the 90th day, compressibility decreased between 18.3 and 19.2 times in air dried samples and between 17.6 and 18.5 times in wet-cured samples. Finally, it was determined that the swelling potential decreased between 67.5 and 270.0 times in the samples that were kept in the air dried at the end of the 90th day and between 54.0 and 101.2 times in the samples that were kept in the wet-cured samples. Test results showed that the compressive strength of low plasticity clayey soil increased and its compressibility and swelling index decreased with time as ultrafine blast furnace slag cement was added to the soil.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Killi zeminlerin yol açtığı sorunlara, geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıkça rastlanmaktadır. Bu tür zeminlerin dezavantajları, düşük basınç dayanımları, şişme ve sıkışabilirlik potansiyelleridir. Bu zeminler, bina temellerinde, asfalt ve/veya beton yollarda ve havaalanı pistlerinde oturma ve taşıma gücü yenilmelerine neden olabilmektedir [1]. Özellikle şişme potansiyeli yüksek kohezyonlu zeminlerin neden olduğu hasarlar, İngiltere de 150 milyon Sterlin ve Amerikada 1 milyar Dolar civarındadır [2]. Yukarıda bahsi geçen sorunların giderilmesi, killi zeminlerin stabilizasyonu ile sağlanır. Stabilizasyon mekanik ve kimyasal olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Mekanik stabilizasyon; zeminlerin yerinde özel ekipmanlarla sıkıştırılıp mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanır. Kimyasal stabilizasyon ise zeminlerin çimento, kireç, uçucu kül vb. malzemeler ile karıştırılıp oluşan kimyasal reaksiyonlar ile mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Şadoğlu ve Çalık kireç ve perlit kullanılarak yüksek plastisiteli killerin geçirimsizliğine etkisini araştırmıştır [3]. Yapmış oldukları çalışmada hem kirecin hemde perlitin stabilizasyon sonrası yüksek plastisiteli kil zeminin geçirimsizliğini oldukça düşürdüğünü görmüşlerdir. Türköz vd. yaptıkları çalışmada şişme potansiyeli yüksek olan killi zeminlerin magnezyum klorür ile stabilize edilmesi konusunu araştırmışlardır [4]. Yaptıkları çalışmada %7 katkı oranından sonra zeminin şişme yüzdesinin oldukça azaldığını görmüşlerdir.

Normal Portland Çimentosu (NPÇ) ile killi zeminlerin stabilizasyonu dünyada en çok bilinen ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Killi zemin ile çimentonun karıştırılması sonucu, dört farklı kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir. Bunlar; çimento hidratasyonu, katyon değişimi, flokülasyon ve aglomerasyon, ve puzolonik reaksiyondur [5]. Killi zeminin suyu ile çimento taneleri temas ettiklerinde, ilk olarak hidratasyon reaksiyonu gerçekleşir. Daha sonra, killi zemin partikülleri ile hidrate olmuş çimento reaksiyona girerek katyon değişimi gerçekleşir ve bunun sonucu flakülasyon ve aglomerasyon oluşur ve killi zeminin plastisitesi düşer. Hidratasyon işlemi sırasında oluşan kireç, puzolonik reaksiyon vasıtasıyla killi zemin partikülleri arasındaki bağlanma artışına katkıda bulunur. Çimento hidratasyonu ve puzolonik reaksiyonlar aylarca hatta yıllarca sürebilir. Bu nedenle, çimento ile stabilize edilmiş killi zemin dayanımının zamanla artması beklenir [6]. NPÇ ile killi zemin stabilizasyonu üzerine birçok araştırma yapılmıştır, yaptıkları çalışmalarda zemin tipinin, gradasyonunun, kullanılacak karışım malzemesi türünün ve miktarının [7-10], karıştırma ve sıkıştırma yönteminin, kür koşullarının ve kür süresinin zeminin stabilizasyonu üzerinde etkili olduğundan bahsetmişlerdir [11-13]. NPÇ ile killi zeminlerin stabilizasyonunda dayanımı etkileyen en önemli faktörler, çimentonun kimyasal yapısı ve stabilizasyonda kullanılan çimento miktarıdır [14-18]. Killi zeminlerde plastik limit değerleri, stabilizasyon sonrası, çimento oranı ve kür süresinin artması ile artmaktadır [18-

21]. Çimentonun killi zemin ile iyi bir şekilde karıştırılması, sonuçların kalitesini etkileyen en önemli faktördür [20]. Araştırmacılar killi zemin içerisindeki organik madde varlığının çimento stabilizasyonunun etkinliğini azalttığını belirtmişlerdir [22, 23]. NPÇ ile killi zeminlerin stabilizasyonunda sıkışabilirlik ve şişme potansiyeli de oldukça azaltılmıştır [1, 7, 10, 24]. Diğer taraftan, curuf ve çimento karışımı ile yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu Cokca vd. [25] tarafından çalışılmıştır. Ancak curuf kökenli çok ince taneli çimento ile yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu ilk kez Mollamahmutoglu ve Avci [26] tarafından çalışılmıştır. Ayrıca, aynı araştırmacılar çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento ile kumlu zeminlerin enjeksiyon yoluyla iyileştirilmesi çalışmalarını da yapmışlardır. Yine aynı şekilde Tekin ve Mollamahmutoglu [27] tarafından ince taneli çimento ile kum zeminleri üzerine enjeksiyon çalışması yapılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, ilk kez hem kimyasal içeriği farklı ve hem de çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento türü ile bu kez düşük plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonu yapılarak, dayanım, sıkışabilirlik ve şişme potansiyeli gibi bazı mühendislik özelliklerinde iyileştirme etkileri araştırılmıştır. Bu yolla, ilgili literatürde tamamlayıcı bilgi sağlanmıştır.

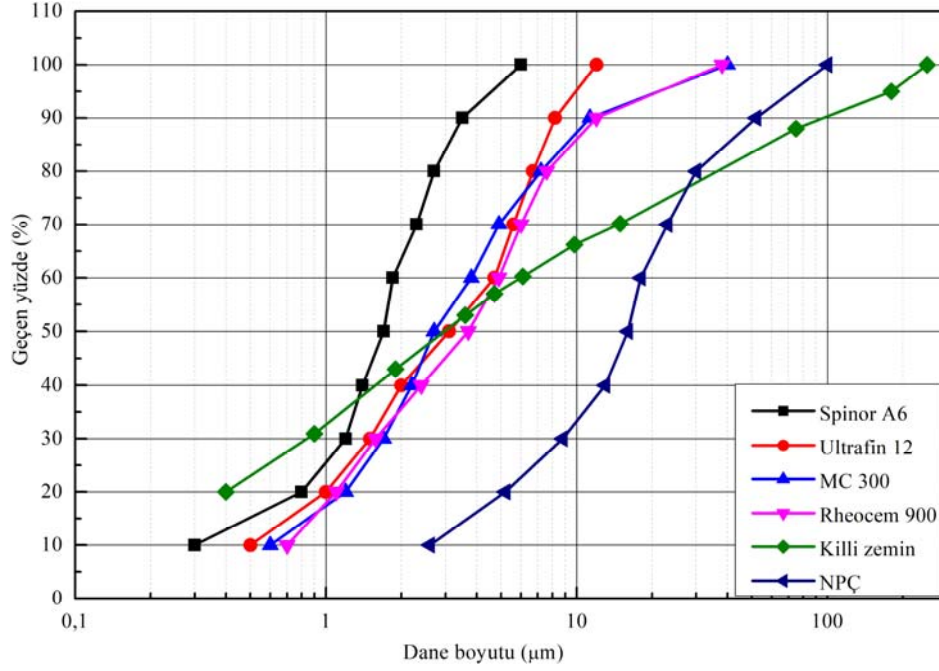
2. KULLANILAN MALZEMELER (USING MATERIALS)

2.1. Düşük Plastisiteli Killi Zemin (Low Plasticity Clayey Soil)

Ankara'nın Gölbaşı ilçesinde, stabilizasyon deneyleri için, zemin yüzeyinden yaklaşık 2,0 m derinlikten örselenmiş (D) ve örselenmemiş (UD) zemin numuneleri temin edilmiştir. Örselenmemiş numunelerin alınmasında Shelby tüpü kullanılmıştır. Numuneler alındıktan sonra, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarına taşınmıştır. Örselenmiş numuneler küçük parçalara ayrılmış, döşeme üzerine yayılarak, oda sıcaklığında (20±3°C) kurumaya terk edilmiştir. Numuneler açık havada kurutulduktan sonra, lastik tokmak vasıtasıyla ezilerek, daha küçük parçalar haline getirilmiştir. Elde edilen bu numuneler üzerinde tane boyu, Atterberg limitleri, özgül ağırlık ve organik madde tayini belirleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasıyla ASTM D422-63, ASTM D4318-10e1 ve ASTM D854-02 [28-30] standartlarına göre yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan killi zemin numunesinin granülometri eğrisi Şekil 1'de, kilin fiziksel özellikleri ise Tablo 1 de verilmiştir. Tablo 1'de, killi zemin numunesinin birleşik zemin sınıflama sistemi (USCS) ne göre düşük plastisiteli kil (CL) ve organik madde miktarında çok düşük olduğu görülmektedir.

2.2. Çok İnce Taneli Yüksek Fırın Cürufu Çimento (Ultrafine Blast Furnace Slag Cement)

Bu deneysel çalışmada Fransız "Holcim" firması tarafından üretilen ve ticari adı Spinor A6 olan çok ince taneli yüksek fırın cürufu çimento kullanılmıştır. Çok ince taneli yüksek



Şekil 1. Deneylerde kullanılan killi zemin, olan çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento, NPÇ ve diğer bazı ince taneli çimentolara ait granüloметриk eğriler

(Grain-size curves of clayey soil, ultrafine blast furnace slag cement, OPC and some microfine cements)

fırın cürüflü çimento'nun tane boyu dağılım eğrisi "Mastersizer" cihazı ile belirlenmiş ve Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 de ayrıca uygulamada kullanılan bazı ince taneli çimentolar (Ultrafin 12, MC 300 ve Rheocem 900) ve NPÇ ait granüloметри eğrileri de karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimentosunun maksimum tane boyu 6 µm'dir. Şekil 1 incelendiğinde, bugüne kadar üretilen ince taneli çimentolar içinde en küçük tane boyutunun Spinor A6'ya ait olduğu görülmektedir. Üretici firmadan temin edilen olan çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento'ya ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

3.1. Çok İnce Taneli Yüksek Fırın Cürüflü Çimento ile Killi Zemin Numunelerinin Karıştırılması (Mixing of Clayey Soils with Ultrafine Blast Furnace Slag Cement)

Deneylere başlamadan önce, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ve killi zemin numuneler, 105 °C etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kurutma sonrası karışım oranlarına bağlı kalarak numuneler (killi zemin ve çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento) bir kap içerisinde devri düşük mikserle homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento, karışıma killi zemin numunesinin ağırlıkça %8, %10 ve %12'si oranında katılmıştır. Daha önce araştırmacıların yaptığı deneysel çalışmalarda, kullanılan çimento oranlarının % 6 ile % 20 aralığında değiştiği görülmektedir [31, 32]. Çimento düşük oranlarda katıldığında etkili bir iyileşme sağlanamamakta, yüksek oranlarda ise iyileştirme ekonomik olmamaktadır [31, 32].

988

Tablo 1. Deneylerde kullanılan killi zemin özellikleri
(Properties of clayey soil used in experiment)

Tanımlama	Değerler
Özgül ağırlık	2,77
200 Nolu elekten geçen (%)	88,2
PL (%)	20
LL (%)	37
Zemin sınıfı	CL
Organik madde (%)	0,65

Tablo 2 Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento'ya ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler (Some physical and chemical properties of ultrafine blast furnace slag cement)

Kimyasal özellik	SiO ₂	19,8
	Al ₂ O ₃	4,2
	Fe ₂ O ₃	4,1
	CaO	62,5
	MgO	2,8
	SO ₃	2,1
Fiziksel özellik	D ₅₀ (µm)	5,1
	D ₉₅ (µm)	11,2
	Özgül ağırlık	3,1
	Özgül yüzey (cm ² /gr)	6250

3.2. Atterberg Limitleri Deneyleri (Atterberg Limit Tests)

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numunelerinin plastik limit ve likit limit değerlerini belirleme deneyleri ASTM D4318-10e1 [29] standartlarına göre yapılmış ve Tablo 3'de verilmiştir.

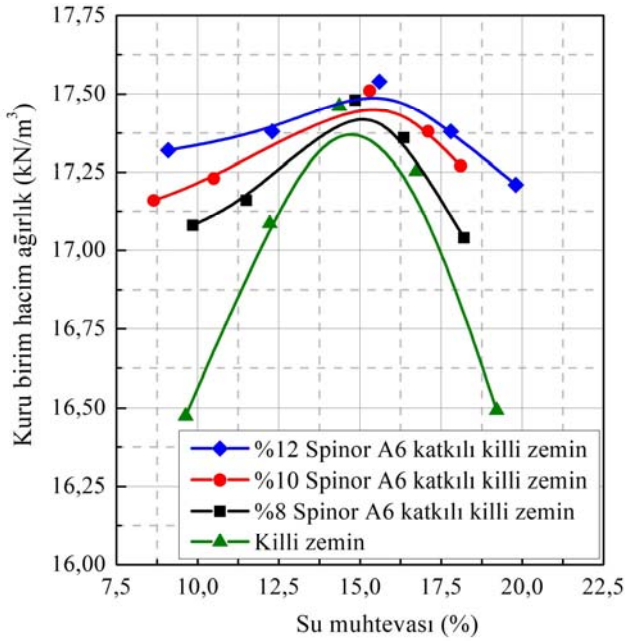
Tablo 3. Katkısız ve çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin LL ve PL değerleri

(LL and PL values of stabilized clayey soil with or without ultrafine blast furnace slag cement)

Karışım	LL (%)	PL (%)
Katkısız killi zemin	37	20
%8 Spinor A6 katkılı killi zemin	42	28
%10 Spinor A6 katkılı killi zemin	45	30
%12 Spinor A6 katkılı killi zemin	46	31

3.3. Kompaksiyon Deneyleri (Compaction Tests)

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ve killi zemin karışımları üzerinde, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevalarının belirlenmesi amacıyla standart Proctor deneyleri yapılmıştır [33]. İlk önce, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ve killi zemin numuneler kuru halde, mikserle mekanik olarak homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra, karışım içine farklı oranlarda su eklenerek, kompaksiyon işlemi sürdürülmüştür. Deneylerin tamamlanmasından sonra, katkısız ve çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numunelerinin standart Proctor eğrileri çizilmiş olup, Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Katkısız ve çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numunelerinin standart Proctor eğrileri (Standard proctor curves of clayey soil with or without ultrafine blast furnace slag cement)

3.4. Tek Eksenli Serbest Basınç Deneyleri (Unconfined Compressive Strength Tests)

Tek eksenli basınç deneyleri için gerekli numunelerin seri bir şekilde hazırlanması amacıyla, paslanmaz çelik malzemeden özel tasarımı numune hazırlama moldu yaptırılmıştır (Şekil

3). Mold tasarlanırken, iç çapı 50 mm ve yüksekliği 100,5 mm olarak seçilmiş ve yükseklik ile çap oranı 2,01 alınmıştır. Bu oran ilgili standartta önerilen 2,0 ile 2,5 aralığını sağlamaktadır [34]. Numunelerin mold’dan çıkışını kolaylaştırmak amacıyla, moldun içi gres yağı ile yağlanmıştır. Optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler, moldun içine 33,5 m yüksekliğinde üç eşit tabaka halinde yerleştirilmiş ve her bir tabaka Proctor sıklığında maksimum kuru birim hacim ağırlığı sağlayacak şekilde 49,5 mm çapında ve 105,5 mm yüksekliğinde çelik tokmak (Şekil 3) vasıtasıyla sıkıştırılmıştır. Çelik tokmağın sapı üzerinde iki adet çentik bulunmaktadır. Her çentik arası 33,5 mm dir. Sıkıştırma yapılırken yeterli sıkışmanın sağlanıp sağlanmadığı çentikler vasıtasıyla kontrol edilmektedir (Şekil 3). Mold tek parçadan oluşmaktadır, moldun içine yerleştirilmiş numuneler numune çıkarma krikosu vasıtasıyla moldun içinden çıkartılmaktadır.

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş numunelerin yarısı, tek eksenli serbest basınç deneylerinin yapılacağı güne kadar 20 ±3°C’de açık hava ortamında laboratuvarında bekletilmiş, diğer yarısı ise streçe sarılı halde 20°C’de kür tankında bekletilmiştir. Böylelikle iki farklı kür koşulu oluşturulmuştur. Seçilen kür koşulları, stabilizasyon sonrası malzemenin atmosfere açık (yol dolgularında) veya kapalı olması (yapı temelleri altında) durumlarını temsil etmektedir. Ayrıca stabilizasyonun etkinliğini belirlemek amacıyla stabilizasyon öncesi kil zemin üzerinde serbest basınç deneyi yapılarak kil zeminin serbest basınç dayanım değeri de belirlenmiştir.

Tek eksenli serbest basınç dayanım deneyleri, her iki kür koşulu için zamana bağlı olarak 3, 7, 28, 56 ve 90. günlerde ASTM D2166-00’da [34] belirtilen hususlara göre yapılmıştır.

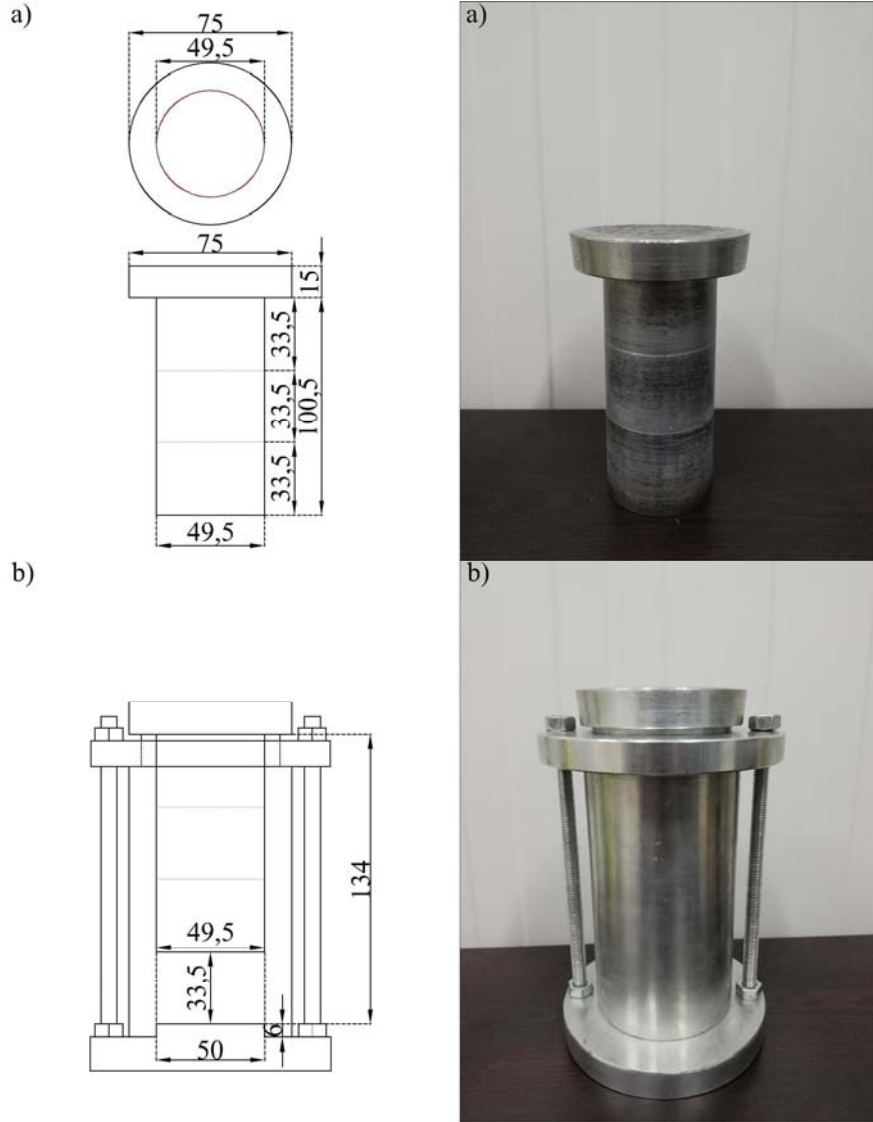
3.5. Sıkışabilirlik ve Şişme Deneyleri (Compressibility and Swelling Tests)

Katkısız ve çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numunelerinin sıkışabilirlikleri ve şişme potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla standart Proctor sıklığında hazırlanmış numuneler, konsolidasyon ringleri içerisine yerleştirilmiş ve deneylerin yapılacağı güne kadar iki farklı kür ortamında bekletilmiştir. Numunelerin yarısı, laboratuvarında 20 ±3°C’de açık hava ortamında, diğer yarısı ise streçe sarılı halde 20 °C’de kür tankında bekletilmiştir. Sıkışabilirlik ve şişme yüzdesi belirleme deneyleri zamana bağlı olarak 7, 28, 56 ve 90. günlerde ASTM D2435-96’da [35] belirtilen hususlara göre yapılmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

4.1. Atterberg Limitleri (Atterberg Limits)

Tablo 3 incelendiğinde, %8, %10 ve %12 çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zeminin LL değerlerinin sırasıyla 42, 45 ve 46 PL değerlerinin ise



Şekil 3. Numune hazırlama moldu; a) tokmak b) mold (Sample preparation mold; a) tamper b) mold)

sırasıyla 28, 30 ve 31 olduğu görülmektedir. Doğal kilin LL değerinin 37 ve PL değerinin de 20 olduğu düşünüldüğünde (Tablo 3) stabilizasyon sonrası hem LL hemde PL değerlerinde artış olmuştur. Atterberg limitlerindeki bu değişimin nedeni, katyon değişim reaksiyonu ve kil partiküllerinin flakülasyonundan kaynaklanmaktadır. LL ve PL deki artış agregasyonlaşma ve çimento partiküllerinin daha büyük boyutlarda bir araya gelmesinin sonucudur. Buda malzemenin işlenebilirliğini (kolaylıkla taşınabilirliğini, yerleştirilmesini ve sıkıştırılmasını) artırmaktadır. Ayrıca, karışımda çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento yüzdesinin artması ile LL ve PL değerleri de artmıştır.

4.2. Kompaksiyon (Compaction)

Şekil 2’de, stabilizasyon öncesi killi zemin numunesinin ve stabilizasyon sonrası çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin kompaksiyon

eğrileri görülmektedir. Katkısız killi zemin numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı $17,46 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevasının ise $\%14,41$ iken, $\%8$, $\%10$ ve $\%12$ çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla $17,49 \text{ kN/m}^3$, $17,51 \text{ kN/m}^3$ ve $17,54 \text{ kN/m}^3$ ve su içerikleri ise sırasıyla $\%14,9$, $\%15,3$ ve $\%15,6$ ’dır. Çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento ile yapılan stabilizasyonda, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, karışımda çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento içeriğinin artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası da artmıştır. Benzer eğilim, diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da görülmektedir [36-38]. Çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento katkıli kompaksiyon eğrilerinde, optimum su muhtevası öncesinde (kuru bölgede) eğriler düzleşme eğilimindedir. Bu eğilim çok ince taneli yüksek fırın çürüflü çimento içeriğinin artmasıyla daha belirgin hale gelmiştir.

Bunun nedeni, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento tanelerinin, kullanılan killi zemin numunesinin tane boylarından daha küçük olması (Şekil 1) ve killi zemin tanelerinin oluşturduğu boşluklara yerleşmesi ile oluşan yeni kompozisyonun sıkıştırma etkisine direnç göstermesidir. Islak bölgede ise, su muhtevasının artmasıyla partiküllerin kayganlık artmış ve sıkışabilirlik artmıştır.

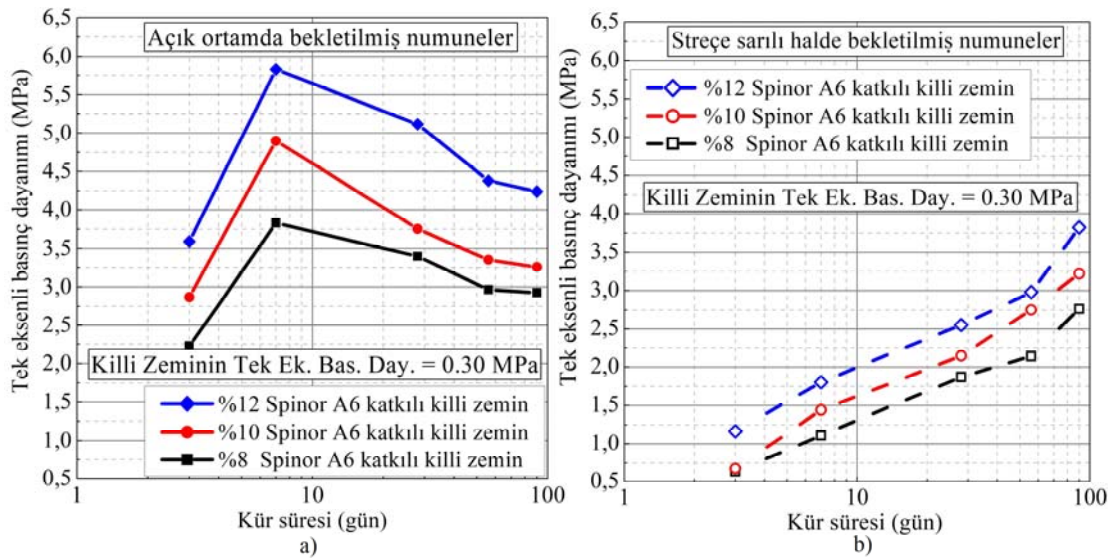
4.3. Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (Unconfined Compressive Strength)

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi numunelere 3, 7, 28, 56 ve 90. günlerde tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmış ve deney sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Ayrıca, numunelerin zamana bağlı su içerikleri değişimleri de belirlenerek, su içeriklerinin zamana bağlı değişimleri de Şekil 5'de verilmiştir.

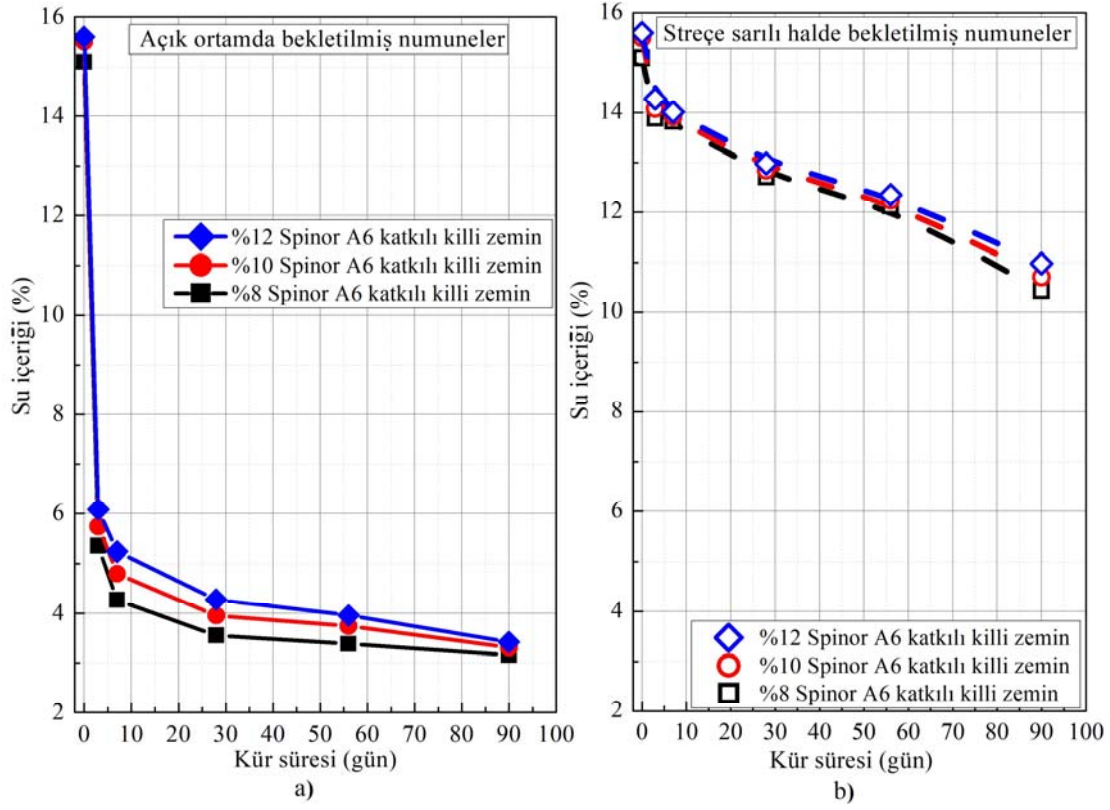
Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış katkısız killi zemin numunesinin tek eksenli serbest basınç dayanımı 0,30 MPa'dır. Diğer taraftan, %8, %10 ve %12 çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı ve açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları 90. gün sonunda sırasıyla 2,93, 3,26 ve 4,24 MPa'dır. Düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmesi ve açık ortamda bekletilmesi ile serbest basınç dayanım değerleri, katkısız killi zeminin dayanım değerine kıyasla 9 ile 14 kat arasında artmıştır. Ayrıca, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanım değeri 7. güne kadar hızlı bir şekilde artmış, fakat 7. günden 28. güne kadar hızlı bir düşüş göstermiştir. Dayanım kaybı, 28. günden sonra azalan hızda devam etmiştir. 56. günden sonrada

oldukça yavaşlamıştır (Şekil 4). Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen killi zemin numuneler kimyasal reaksiyonlar için tüketilen su miktarına ilave olarak, evaporasyonun etkisiyle hızlı bir şekilde su muhtevası kaybına uğramış (Şekil 5) ve oluşan matriks emmeninde (zemin emmesinin) etkisiyle kimyasal reaksiyonların kazandırdığı dayanıma ilave bir dayanım artışı sağlamıştır (Şekil 4). Zamanla, gittikçe artan su muhtevası kaybı özellikle 28. günden sonra matriks emmenin azalmasına yol açmış, bu da serbest basınç dayanımında ilk bir haftada matriks emme etkisiyle kazanılan ilave dayanımın kaybına neden olmuştur (Şekil 4 ve Şekil 5). %8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve streçe sarılı halde kür tankında bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımları 90. güne kadar artış göstermiş ve 90. gün sonunda sırasıyla 2,77, 3,22 ve 3,82 MPa değerlerine ulaşmıştır. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve streçe sarılı halde bekletilen killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanım değerleri zamana bağlı olarak katkısız killi zeminin dayanım değerine kıyasla 9 ile 12 kat arası artmıştır. Numunelerde karışım sonrası dayanım artışı, kimyasal reaksiyonlar sonucu yavaş bir şekilde gerçekleşmiş ve 90. güne kadar devam etmiştir. Dayanım artışı ile birlikte, su muhtevasında kimyasal reaksiyonlar nedeniyle orantısız bir azalma gözlemlenmiştir (Şekil 5). Streçe sarılı halde kür tankında bekletilen killi zemin numunelerinin su muhtevası değerleri, 90. gün sonunda açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinin su muhtevası değerlerinden %325 daha fazladır (Şekil 5).

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanım değerleri 90. gün sonunda, streçe sarılı halde kür tankında bekletilen killi zemin numunelerinin



Şekil 4. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkılı killi zemin numunelerinin kür farklı kür koşullarında tek eksenli serbest basınç dayanımlarının zamanla değişimi (a) Açık ortamda bekletilmiş olan numuneler (b) Streçe sarılı halde bekletilmiş olan numuneler (Variation of unconfined compressive strength of ultrafine blast furnace slag cement mixed clayey soil with time (a) air-dried samples (b) wet cured samples)



Şekil 5. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin farklı kür koşullarında su içeriklerinin zamanla değişimi (a) Açık ortamda bekletilmiş olan numuneler (b) Streçe sarılı halde bekletilmiş olan numuneler

(Variation of water content of ultrafine blast furnace slag cement mixed clayey soil with time (a) air-dried samples (b) wet cured samples)

serbest basınç dayanımı değerlerinden ortalama %6 daha fazladır (Şekil 4). Her iki kür koşulunda elde edilen dayanım değerleri birbirine çok yakındır. Bu da çok bariz olarak, matris emmenin etkisinin zamanla kaybolduğunu ve dayanım artışında kimyasal reaksiyonların belirgin rol oynadığını göstermektedir.

Her iki kür koşullarında da, çimento oranının artması ile serbest basınç dayanım değerleri artmıştır.

4.4. Sıkışabilirlik (Compressibility)

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve farklı kür koşullarında bekletilmiş olan düşük plastisiteli killi zeminler üzerinde zamana bağlı sıkışabilirlik deneyleri yapılmıştır. Şekil 6'da 90. gün sonunda düşey gerilmenin hacimsel şekil değiştirme değerleri ile ilişkisi, Şekil 7'de ise hacimsel şekil değiştirme değerlerinin zamana bağlı sıkışabilirlik değerleri ile değişimi verilmiştir.

Standart Proctor sıklığında hazırlanan düşük plastisiteli killi zeminin sıkışabilirlik (yüzde olarak hacimsel şekil değiştirme) değeri %24'dür. %8, %10 ve %12 çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento oranları ile stabilize edilen killi zemin numunelerinin açık havada bekletilmesi ile sıkışabilirlik yüzdeleri, 90. gün sonunda sırasıyla %1,31, %1,28 ve %1,25 dir (Şekil 6 ve Şekil 7). Çok ince taneli

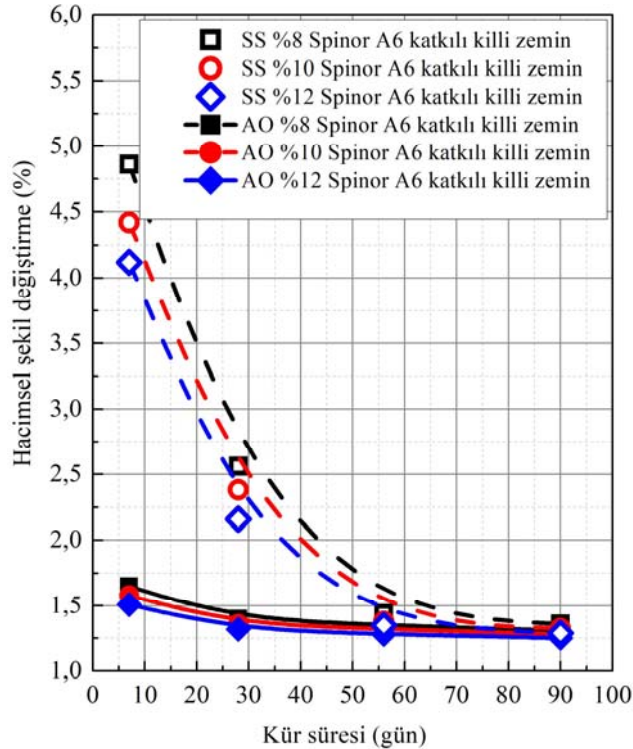
yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık havada bekletilen killi zemin numunelerinin sıkışabilirliklerinde, katkısız düşük plastisiteli killi zeminin sıkışabilirlik değerine kıyasla 7. gün sonunda 14,5 ile 15,9 kat, 90. gün sonunda ise 18,3 ile 19,2 kat arasında bir azalma olmuştur. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinde evaporasyonunda etkisiyle kuruma hızlanmış ve sıkışabilirlik potansiyeli kısa sürede hızla azalmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7).

%8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin streçe sarılı halde kür tankında bekletilmesi ile sıkışabilirlik yüzdeleri 90. gün sonunda sırasıyla %1,36, %1,33 ve %1,29'dur (Şekil 8 ve Şekil 9). Söz konusu numunelerin sıkışabilirlik potansiyellerinde, katkısız düşük plastisiteli killi zeminin sıkışabilirlik değerine kıyasla 7. gün sonunda 4,9 ile 5,8 kat, 90. gün sonunda 17,6 ile 18,5 kat arasında bir azalma olmuştur. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve streçe sarılı halde kür tankında bekletilen numunelerde, reaksiyon açık havada bekletilen numunelere kıyasla daha yavaş gelişmiş ve sıkışabilirlik zamanla azalmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7). Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve streçe sarılı halde bekletilmiş olan killi zemin numunelerinin sıkışabilirlik yüzdeleri, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü

çimento ile stabilize edilmiş ve fakat açık ortamda bekletilmiş olan numunelerin sıkışabilirlik yüzdeleri 90. gün sonunda birbirine oldukça yakındır. Bu da daha öncede vurgulandığı gibi evaporasyon yoluyla numunelerin su muhtevası kaybindan çok, kimyasal reaksiyonların etkisidir (Şekil 6 ve Şekil 7). Şöyle ki; killi zeminlerin çimento türü katkı maddeleri ile stabilizasyonu sonucu, puzolanik reaksiyonlar aşamasında ortaya çıkan çimento materyalleri, taneler arasındaki boşlukları doldurmakta ve taneler arasındaki teması güçlendirip, sıkışabilirliği azaltmaktadır [39, 40]. Her iki kür ortamında da çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin karışımında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento içeriğinin artması ile sıkışabilirlik potansiyelleri azalmaktadır (Şekil 6 ve 7). Sıkışabilirliğin azalması, inşaat mühendisliği uygulamalarında yapılar altında oluşabilecek oturmaları ve dolayısıyla oturmalarından kaynaklanabilecek hasarları da azaltmış olacaktır.

4.5. Şişme Potansiyeli (Swelling Potential)

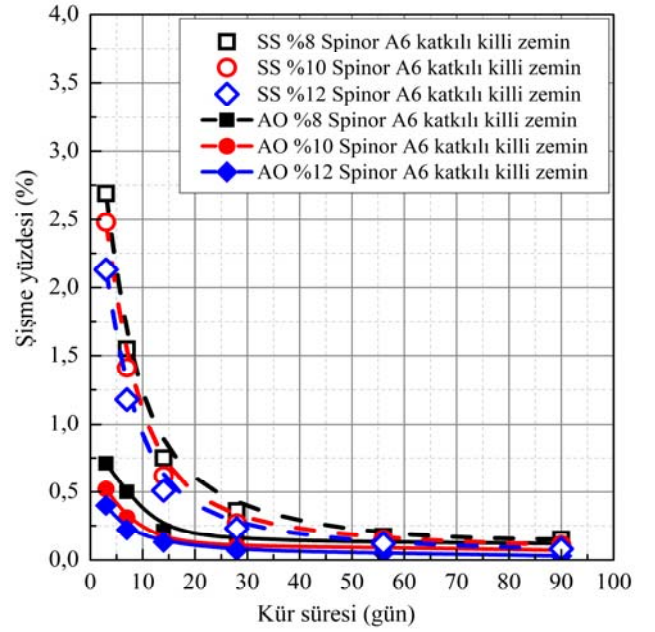
Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve farklı kür koşullarında bekletilmiş olan düşük plastisiteli killi zeminler üzerinde zamana bağlı şişme yüzdesi belirleme deneyleri yapılmıştır ve deney sonuçları Şekil 7 de verilmiştir.



Şekil 7. Açık ortamda bekletilen (AO) ve Streçe sarılı halde bekletilen (SS) çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin zamana bağlı hacimsel şekil değişimi

(Variation of volumetric deformation of ultrafine blast furnace slag cement mixed clayey soil with curing time)

Düşük plastisiteli killi zeminin standart Proctor sıklığında şişme yüzdesi değeri %8,1 dir. %8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin açık havada bekletilmesi ile şişme yüzdeleri 90. gün sonunda sırasıyla %0,12, %0,07 ve %0,03 olarak tespit edilmiştir (Şekil 8). Söz konusu numunelerin şişme yüzdelerinde, katkısız killi zeminin şişme yüzdesine kıyasla 7. gün sonunda 11,4 ile 20,3 kat, 90. gün sonunda ise 67,5 ile 270,0 kat arasında bir azalma olmuştur. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık havada bekletilen killi zemin numunelerde reaksiyon evaporasyon ile hızlanmış ve bunun sonucu şişme yüzdeleri kısa sürede hızla azalmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Açık ortamda bekletilen (AO) ve Streçe sarılı halde bekletilen (SS) çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin zamana bağlı şişme yüzdesi

(Variation of swelling percentage of ultrafine blast furnace slag cement mixed clayey soil with curing time)

%8, %10 ve %12 oranlarında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve streçe sarılı halde kür tankında bekletilmiş killi zemin numunelerinin 90. gün sonunda şişme yüzdeleri sırasıyla %0,15, %0,11 ve %0,08 olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Söz konusu numunelerin şişme yüzdelerinde, katkısız killi zeminin şişme yüzdesine kıyasla 7. gün sonunda 3,01 ile 3,80 kat, 90. gün sonunda ise 54,0 ile 101,2 kat arasında bir azalma olmuştur. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve streçe sarılı halde kür tankında bekletilen numunelerde reaksiyon, açık havada bekletilen numunelere kıyasla daha yavaş gelişmiş ve şişme yüzdelerinde azalma da daha yavaş gerçekleşmiştir (Şekil 8).

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş ve açık havada bekletilmiş olan killi zemin

numunelerin şişme yüzdeleri, streçe sarılı halde bekletilmiş olan killi zemin numunelerinin şişme yüzdelerinden daha düşük çıkmıştır (Şekil 8). Ancak, görüldüğü gibi bu fark önemsenecek büyüklükte değildir. Şişme potansiyelinin azalmasında önemli etken yine kimyasal reaksiyonlardır. Şöyle ki: çimento nedeniyle killerde bulunan sodyum ve potasyum gibi tek değerlikli katyonlar arasında hidrasyon sonrasında katyon değişimi oluşmakta ve kilin su emme özelliği azalmaktadır, bu da kilin şişme potansiyelini azaltmaktadır [1, 38, 39, 41].

Her iki kür ortamında test edilen çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento katkıli killi zemin numunelerinin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento oranının artması ile şişme yüzdeleri azalmıştır (Şekil 8). Kohezyonlu zeminlerde şişme nedeniyle temel tabanında oluşan aşırı basınçlar, yapıların yukarı doğru hareketini zorlamakta ve yapıda hasarlara (çatlamalara ve uniform olmayan deformasyonlara) neden olmaktadır. Genellikle hafif ve orta yapılarda (yollar, tek ve iki katlı müstakil yapılar vb.) şişme nedeniyle oluşan hasarlar oldukça yaygındır. Bu çalışma stabilizasyon yoluyla oluşan bu tür hasarların önüne geçilmesi için iyi bir yöntem teşkil etmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilizasyonu LL ve PL değerlerinde artışa yol açmıştır. Ayrıca, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento stabilizasyonunda çimento içeriğinin artması da LL ve PL değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu yolla düşük plastisiteli killi zeminin işlenebilirliğide artmıştır.

Düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmesi, killi zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerini arttırmıştır. Karışımda, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento yüzdesinin artması ile kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri de artmıştır.

Düşük plastisiteli killi zeminin çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmesi ve açık ortamda bekletilmesi ile serbest basınç dayanım değerleri çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento içeriğine ve zamana bağlı olarak, katkısız killi zeminin dayanım değerine kıyasla 9 ile 14 kat arasında artmıştır.

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve nem ortamında bekletilen killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanım değerleri, çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento içeriğine ve zamana bağlı olarak, katkısız killi zeminin dayanım değerine kıyasla 9 ile 12 kat artmıştır. 90. gün sonunda her iki kür ortamında bekletilen numunelerde dayanım değerleri birbirine oldukça yakın

çıkmıştır. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen düşük plastisiteli killi zemin numunelerinin sıkışabilirlik yüzdeleri her iki kür koşulunda da birbirine çok yakın çıkmıştır. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen killi zemin numunelerinin 90.gün sonunda sıkışabilirlik yüzdelerinde, katkısız killi zemin numunesine kıyasla, 18,3 ile 19,2 kat arasında bir azalma olmuşken, nemli ortamda bekletilen numunelerinin 90. gün sonunda sıkışabilirlik yüzdelerinde 17,6 ile 18,5 kat arasında bir azalma olmuştur. Her iki kür ortamında da çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin karışımında çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento içeriğinin artması ile sıkışabilirlik potansiyelleri azalmıştır.

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen ve açık ortamda bekletilen düşük plastisiteli killi zemin numunelerinin şişme yüzdelerinde, katkısız killi zeminin şişme yüzdesine kıyasla 90. gün sonunda 67,5 ile 270,0 kat arasında bir azalma olmuştur. Benzer şekilde, nemli ortamda bekletilen numunelerinin şişme yüzdelerinde ise, 90.gün sonunda 54,0 ile 101,2 kat arasında bir azalma olmuştur. Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilen killi zemin numunelerinin şişme yüzdeleri her iki kür koşulundada çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento içeriğine ve zamana bağlı olarak azalmıştır.

Çok ince taneli yüksek fırın cürüflü çimento ile stabilize edilmiş olan düşük plastisiteli killi zeminde, dayanım, sıkışabilirlik ve şişme gibi mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kür koşullarından çok, katkı maddesi içeriği ve birincil (hidrasyon) ve zamana bağlı ikincil reaksiyonların (puzzolanik) belirleyici olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Nelson, J.D., ve Miller, R.D., Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering, John Wiley and Sons, New York, 1992.
2. Gourly, C.S., Newill, D., ve Schreiner, H.D., Expansive soils: TRL's research strategy, 1st international symposium on engineering characteristics of arid soils, Balkema, London, 247-260, July 6-7, 1994.
3. Şadoğlu E. ve Çalık Ü., Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 551-562, 2020.
4. Türköz M., Savaş H., Tosun H., Stabilization of problematic clay soils with magnesium chloride solution, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (1), 234-242, 2011.
5. Prusinski, J. R., Bhattacharja, S., Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils, Transport. Res. Rec., 1652, 215-227, 1999.
6. Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., ve Balasubramaniam, A. S., Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments, ASCE Press, New York, 1996.

7. Miura, N., Horpibulsuk, S., Nagaraj, T. S., Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Found.*, 41 (5), 33–45, 2001.
8. Horpibulsuk, S., Suddepong, A., Chinkulkijniwat, A., Liu, M. D., Strength and compressibility of lightweight cemented clays, *Applied Clay Science*, 69, 11–21, 2012.
9. Cong, M., Longzhu, C., Bing, C., Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer, *Construction and Building Materials*, 71, 354–362, 2014.
10. Sasanian, S., Newson, T. A., Basic parameters governing the behavior of cement-treated clays, *Soils and Foundations*, 54 (2), 209-224, 2013.
11. Wong, L. S., Mousavi, S., Sobhani, S., Kong, S. Y., Birima, A. H., Pauzi, N. I. M., Comparative Measurement of Compaction Impact of Clay Stabilized with Cement, Peat Ash and Silica Sand, *Measurement*, 94, 498-504, 2016.
12. Mousavi, S., Wong, L. S., Performance of Compacted and Stabilized Clay with Cement, Peat Ash and Silica Sand, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 9 (1), 20-32, 2015.
13. Cong, M., Longzhu, C., Bing, C., Analysis of Strength Development in Soft Clay Stabilized with Cement-Based Stabilizer, *Construction and Building Materials*, 71, 354-362, 2014.
14. Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., Honjo, Y., Deep mixing method using cement hardening agent, *Proceedings of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm, 721-724, 15-19 June, 1981.
15. Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T., State of the art in deep mixing technology, *Ground Improvement*, 4 (3), 91–110, 2000.
16. Cokca, E., Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7), 568-573, 2001.
17. Chew, S. H., Lee, F. H., Lee, Y., Jet grouting in Singapore marine clay, *Proc. 3rd Asian Young Geotechnology Engineering Conf.*, Singapore, 1997.
18. Uddin, K., Balasubramaniam, A. S., Bergado, D. T., Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay, *Geotech. Eng. J.*, 28 (1), 89–119, 1997.
19. Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., Bhaskar R. K. V., Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soil, *Ground Improvement*, 4 (1), 37–45, 2000.
20. Ahnberg, H., Johansson, S. E., Pihl, H., Carlsson, T., Stabilising effects of different binders in some Swedish soils, *Ground Improvement*, 7 (1), 9-23, 2003.
21. Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., Lee, F. H., Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130 (7), 696–706, 2004.
22. Mitchell, J. K., Soil improvement state of the art report, *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 506-565, 15-19 June, 1981.
23. Tremblay, H., Leroueil, S., Locat, J., Mechanical improvement and vertical yield stress prediction of clayey soils from eastern Canada treated with lime or cement, *Can. Geotech. J.*, 38, 567–579, 2001
24. Balasubramaniam, A. S., Kamruzzaman, A. H. M., Uddin, K., Lin, D. G., Phienwij, N., Bergado, D. T., Chemical stabilization of Bangkok clay with cement, lime and fly ash additives, *Proceeding 13th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Taipei, Taiwan, 253-258, 16-20 November, 1998.
25. Cokca, E., Veysel Y., Ozaydin, V., Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 27 (4), 489-499, 2009.
26. Mollamahmutoglu, M., Avci, E., Engineering Properties of Slag-Based Superfine Cement-Stabilized Clayey Soil, *ACI Materials Journal*, 115 (4), 541-548, 2018.
27. Tekin E., Mollamahmutoglu M., The groutability of microfine cement (Rheocem 900) grouts into various graded sands, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 533-539, 2010.
28. ASTM D422-63, Standard test method for particle-size analysis of soils, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.
29. ASTM D4318-10e1, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2010.
30. ASTM D854-02, Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2002.
31. Bell, F. G., *Engineering treatment of soils*, Chapman & Hall, London, 1993.
32. Das, B.M., Sivakugan, N., *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, Cengage Learning, Boston, 2015.
33. ASTM D698-00a, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³)), American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2000.
34. ASTM D2166-00, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2000.
35. ASTM D2435-96, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 1996.
36. Richardson, D. N., AASHTO layer coefficients for cement-stabilized soil bases, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8 (2), 83–87, 1994.
37. Bhattacharja, S., Bhatta, J., Comparative performance of portland cement and lime in stabilization of moderate to high plasticity clay soils, *Portland Cem. Assoc.*, RD125, Skokie, Illinois, 2003.
38. Aniculăesi, M., Stanciu, A., Lungu, I., Behavior of expansive soils treated with eco-cement, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi-Construction & A LVII (LXI) (f. 2)*, 2 (1), 9–19, 2011.

39. Petry, T.M., Armstrong, J.C., Stabilization of Expansive Clay Soils, Transportation Research Report, 1219, 103-112, 1989.
40. Ho, M.H., Chen, C.M., Some Mechanical Properties of Cement Stabilized Malaysian Soft Clay, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2 (11), 76-83, 2011.
41. Estabragh, A.R., Pereshkafti, M.R.S., Parsaei, B., Javadi, A. A. Stabilised expansive soil behaviour during wetting and drying, International Journal of Pavement Engineering, 14 (4), 418-427, 2013.