



Araştırma Makalesi / Research Article

Şişen Killerin İyileştirilmesinde Jips Kolonu Performansının Araştırılmasına İlişkin Laboratuvar Model Çalışması

A Laboratory Model Study Related with the Determination of Gypsum Column Performance in Treatment of Expansive Soils

Işık YILMAZ 

Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

Geliş (Received): 17 Ekim (October) 2018 / Düzeltme (Revised): 07 Kasım (November) 2018 / Kabul (Accepted): 20 Kasım (November) 2018

ÖZ

Killi zeminler üzerine inşa edilen özellikle hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, bu yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme özelliklerinin ve uygun iyileştirme yönteminin belirlenmesi çok büyük önem taşımaktadır. Literatürde kireç, çimento, uçucu kül, jips, bitüm, reçine, kimyasallar, vb. ile ilgili birçok zemin iyileştirme yöntemlerine sıklıkla rastlanmaktadır. Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bu yöntemlerin başında iyileştirme kimyasalları ve finansal boyutun önemi büyüktür. Bu nedenle düşük maliyette en iyi iyileştirmenin yapılması birincil amaçtır. Bu çalışma kapsamında killi zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolonlarının performansının araştırılmasına ilişkin bir laboratuvar model çalışmasının gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Amaca yönelik olarak; laboratuvarda hazırlanan bir arazi modeline yerleştirilen jips kolonu ile kolondan itibaren mesafeye bağlı olarak zeminin şişmesinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Elde edilen model verilerine dayalı olarak da jips kolon tekniğinin iyileştirme performansı araştırılmış ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Killi zeminler, İyileştirme, Şişme, Jips Kolonu, Laboratuvar Model

ABSTRACT

The most important soil behaviour in order to consider in foundation designs of specially light structures built on clay soils is swelling properties of the soil and accordingly soils heave which occurs on soil surface. For this reason, in surveys related to this kind of soils, it is quite important to determine the swelling properties of soils and appropriate stabilisation methods. Literature contains a vast number of stabilising techniques such as; lime, cement, fly ash, bitume and resin for treatment of expansive soils. Financial perspective of these techniques is very important. Therefore, the primary purpose is low cost for the best treatment. In this study, a laboratory model study was conducted in order to determine the performance of gypsum column technique on treatment of clay soils. For this purpose, gypsum column was built in a field model which built in the laboratory and the changes on swelling of the soil was determined depending on the distance from the column. By using the obtained model data, the performance of gypsum column technique was analyzed and discussed.

Keywords: Clay Soils, Stabilization, Swelling, Gypsum Column, Laboratory Model

GİRİŞ

Yeryuvarı üzerinde sıkça karşılaşılan zemin sorunları arasında çökme, şişme, dispersif özellik gösteren zeminler bulunmaktadır. Sorunlu zeminler zemin mekaniği açısından ciddi sorunlar teşkil etmektedir. Özellikle şişebilen killi zeminlerde hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme potansiyeli, şişme sonucunda oluşacak maksimum basınç düzeyi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarının belirlenmesi ve öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Şişen zeminler suyla karıştırıldıklarında hacim değişimi gösteren ve üzerinde bulunan yapılara ve kazık destek sistemlerine zarar verebilen, yarı kurak veya kurak iklimlerde oluşmuş killerdir. Şişme özelliğinin montmorillonit ve illit tipi killere özgü bir olay olduğu söylenebilir. Bazı durumlarda killer tek, bazılarında ise üç boyutta şişme özelliği göstermektedir. Bazen de zeminlerde yanal şişme basıncı düşey yöndeki değerinin iki katına çıkabilmektedir. Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi, killerin tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği, kıvam, dayanım ve yoğunluk, su tutma enerjisi ise hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkiler. Mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Kil üzerine uygulanan gerilmeler, doğal ve yapay yükler kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler genellikle bu nem hareketi ile kontrol edilir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan

kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim, sıcaklık değişimi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır. Killerde kuruma sonucu büzülme, su emme sonucu şişme gibi istenmeyen sonuçlar nem hareketlerinden dolayı oluşur.

Bu zeminler örneğin sadece Amerika'da binalara, yollara, hava alanlarına ve diğer tesislere bir yılda yaklaşık 9 milyar dolar zarar vermektedir. Bu miktar depremlerden, taşkınlardan, kasırgalardan ve hortumlardan kaynaklanan hasarın neredeyse iki katıdır (Jones ve Holtz, 1987). Bir kıyaslama yapılması amacıyla Çizelge 1' de Amerika'da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar miktarları verilmiştir.

Çizelge 1. Amerika'da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar (Jones ve Holtz, 1987).

Table 1. The annual damages in America sourced from the expansive soils (Jones and Holtz, 1987).

Kategori	Yıllık Hasar (U.S. \$)
Karayolları ve caddeler	4 550 000 000
Ticari binalar	1 440 000 000
Müstakil evleri	1 200 000 000
Yaya yolları, taşıt yolları ve park alanları	440 000 000
Gömülü kamu kuruluşları ve servisleri	400 000 000
Çok katlı binalar	320 000 000
Havaalanı tesisleri	160 000 000
Yerleşim alanı heyelanı	100 000 000
Diğer	390 000 000
Toplam yıllık hasar (1987)	9 000 000 000

Şişebilen killi zeminlerin şişme potansiyelleri; üzerlerinde bulunan örtü gerilmesine, yük kaldırılmasına veya su içeriğindeki artışlara bağlıdır. Bell ve Maud (1995), Yılmaz ve Karacan (1997) ve Yılmaz

(2007 a, b) özellikle hafif yapıların şişme ile meydana gelen zemin kabarmalarına karşı yeterli miktarda mukavemet gösterememelerinin yapı üzerinde çok şiddetli hasarların oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Bir zemini problemlili olarak değerlendiren mühendis aşağıdaki yöntemlere başvurur;

1. Problemlili zemin kaldırılarak yerine daha uygun özellikteki zemin uygun tekniklerle yerleştirilir. Bu yöntem zemin hacmi büyüdükçe ekonomiklikten uzaklaşmaktadır.
2. Mühendislik projesinin boyutlarını zeminin durumuna uygun olarak seçmek veya sorunlu zemini aşarak yapıyı alttaki sağlam zemine taşımak. Bu yöntem de bazen ekonomiklikten uzaktır.
3. Zeminin özelliklerini istenilen yönde değiştirmek. Bu tür uygulamalar yüzyıllardan beri uygulanmakta olup zemine kimyasal maddeler katmak, zemini ısıtmak, dondurmak, sıkıştırmak gibi işlemlerle zeminin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntem ekonomik olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerin başında iyileştirme kimyasalları ve finansal boyutun önemi büyüktür. Bu nedenle düşük maliyette en iyi iyileştirmenin yapılması birincil amaçtır.

Zemin iyileştirilmesi çok eski zamanlardan beri kullanılmakta olup mekanik iyileştirmenin yeterli olmadığı durumlarda kimyasal iyileştirme yöntemleri daha çok tercih edilmektedir. Kimyasal iyileştirmede zemine çeşitli katkı maddeleri katılarak zeminin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bugüne kadar reçineden mermer tozuna kadar pek çok katkı maddesi denenmiş olmakla birlikte literatürde en

sık kullanılan katkı maddeleri kireç, uçucu kül ve çimento olarak sayılabilir (Van Impe, 1989).

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi sırasında katkı maddesi zeminle yüzeysel olarak karıştırılır ya da zemin içerisinde kolonlar oluşturulur. Kolon uygulamasındaki temel amaç katkı maddesinin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu ile zeminin özelliklerini iyileştirmesidir. Literatürde en sık olarak kireç kolonu tekniği kullanılmakla beraber uçucu kül ve çimentonun kullanıldığı kolon uygulamaları da mevcuttur.

Şişebilen sorunlu zeminleri iyileştirme amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiş ve killi zeminlerin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinin kireç, uçucu kül, çimento ve bunların değişik oranlardaki katkıları şeklinde olduğu görülmüş olmakla beraber ulusal ve uluslararası literatürde bu konuda yayınlanmış (Townsend ve Kylv, 1966; Brandl, 1981; Handy ve Williams, 1967; Tystovich vd., 1971; Broms ve Boman, 1979; Terashi vd., 1980; Locat vd., 1990; El-Rawi ve Awad, 1981; Holm ve Broms, 1981; Kitsugi ve Azakami, 1982; Transportation Research Board, 1987; Mathew ve Narasimha, 1997; Ferguson, 1993; Popescu vd., 1997; Basma vd., 1998; Nalbantoğlu ve Güçbilmez, 2001; Okagbue ve Onyeobi, 1999; Akawwi ve Kharabsheh, 2000; Ji-ru ve Xing, 2002; Tonoz vd., 2003; Amu vd., 2005; Al-Mukhtar vd., 2012; Gyanen vd., 2013; Abiodun ve Nalbantoglu, 2015; Garzón vd., 2016; Singh vd., 2017; Vitale vd., 2017; Zhu vd., 2018) bir çok çalışma vardır.

Jipsin kullanımına ilişkin çalışma sayısı ise oldukça az olmakla birlikte özellikle son bir kaç yılda ilgili çalışmalarda artış gözlenmektedir. Benzer şekilde bu çalışmalar; jipsin tek başına ve/veya diğer malzemelerle değişik oranlarda karışımları şeklinde literatürde (FIPR., Florida Institute of Phosphate Research, 1988; Çetiner,

2004; Ameta vd., 2007; Yılmaz ve Civelekoğlu, 2009; Küçükali, 2011) bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardan da görülebileceği gibi jipsin katkı maddesi olarak kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar oldukça sınırlı miktardadır. Bu çalışma kapsamında şişen killi zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolunun performansının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir laboratuvar model çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zeminlerin jips kolunu kullanarak iyileştirilmesi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan bu çalışma ile hem jipslerin katkı maddesi olarak şişebilen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğine ilişkin yakın zamanda gerçekleştirilmiş çalışmaların devamı olarak katkı konulması, hem de oldukça ucuza mal edilebilen jipsle iyileştirmenin “jips kolonu” uygulaması ve performansının ortaya konulması ile arazi uygulamaları bakımından altlık oluşturulması amaçlanmıştır.

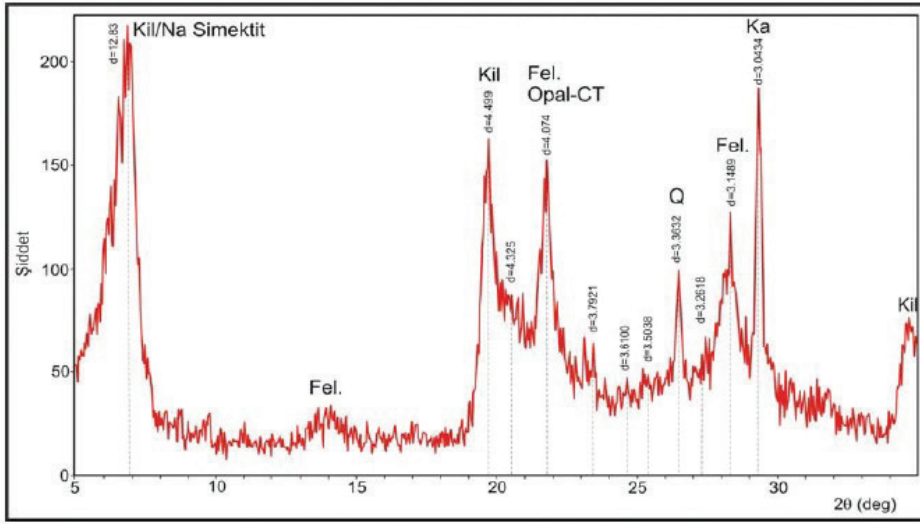
MATERYAL VE METOD

Kullanılan Bentonit ve Jipsin Özellikleri

Bentonitler volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışmasıyla veya bozulmasıyla olmuşlardır. İçerisinde büyük oranda montmorillonit minerali bulundurmasının yanı sıra alüminyum ve magnezyumca da zengin bir kil mineralidir. Bentonit ($Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$) genel formülü ile tanımlanmakta olup plastiklik özelliği yüksek, konkoidal yapıda

olup kolaylıkla şekil verilebilen bir kil çeşidi olarak bilinmektedir (Gillson, 1960; Grim, 1968; Murray, 1991). Bentonitin içinde doğal katkı maddesi olarak kaolin ve illit gibi kil mineralleri ile jips, kuars, rutil, kalsit, dolomit ve volkanik kül gibi kil dışındaki minerallerde yer alabilmektedir. Bentonitler su ile temas ettiklerinde değişken seviyelerde şişme gösterirler. Şişme özelliklerine ve değişebilen iyonlarına göre 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; sodyum bentonit (Na-B), sodyum-kalsiyum bentonit (Na, Ca-B) ve kalsiyum bentonit (Ca-B) şeklinde tanımlanırlar. Sodyum bentonitler su ile temas haline geçtiklerinde fazla şişerken, sodyum-kalsiyum bentonitler orta derece de şişme göstermekte, kalsiyum bentonitler ise oldukça az şişmektedir.

Bu çalışmada kullanılan bentonit Reşadiye'nin 25 km kuzeyinde yer alan Samaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından alınmıştır. Kullanılan bentonit, doğal, saf ve işlem görmemiş sodyum bazlı malzemeler arasından seçilmiştir. Söz konusu bentonit Yılmaz ve Civelekoğlu (2009) tarafından yapılan çalışmada da kullanılmıştır. Dolayısıyla bentonite ait XRD difraktomu Yılmaz ve Civelekoğlu (2009)'nun çalışmasından elde edilmiştir. Şekil 1 ve 5'de verilen karakteristik difraktogramda da görüldüğü gibi kullanılan bentonit, Na-Simektit (montmorillonit) türü kil minerali içermekte olup çok küçük miktarda feldispat, kalsit ve opal-CT gözlenmiştir (Çizelge 2).



Şekil 1. Kullanılan bentonite ait karakteristik XRD difraktogramı (Yılmaz ve Civekoğlu, 2009).

Figure 1. Characteristic XRD graph for the used bentonite (Yılmaz and Civekoğlu, 2009).

Çizelge 2. XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi (Yılmaz ve Civekoğlu, 2009).

Table 2. The results of the XRD (whole rock) analyses and the chemical composition of the used bentonite (Yılmaz and Civekoğlu, 2009).

Mineral Yüzdesi	Oran
Na-Smektit (%)	81
Feldispat (%)	7
Kuvars (%)	2
Kalsit (%)	2
Opal- CT (%)	8

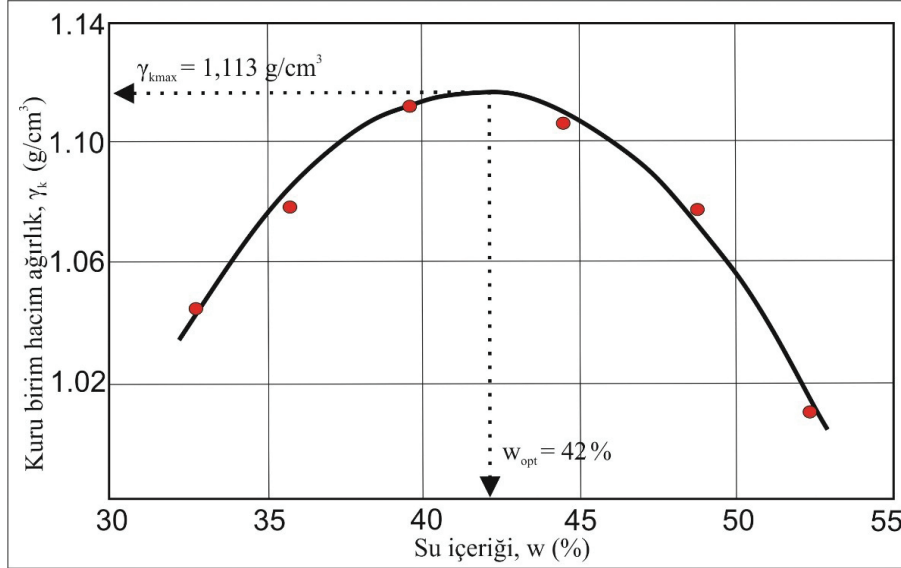
Optimum Su İçeriği ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı

Çalışmada kullanılan bentonitin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim

ağırlığını bulmak amacıyla ASTM D-698 (1994) standardına uygun olarak Standart Proktor deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 2’de sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre söz konusu bentonitin optimum su içeriği (w_{opt}) %42, maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ise 1.113 g/cm³ olarak bulunmuştur.

Atterberg Sınırları

Çalışmada kullanılan bentonit üzerinde BS 1377 (1975)’ye uygun olarak likit limit (LL) ve plastik limit (PL) deneyleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3). Elde edilen likit limit ve plastik limit değerleri kullanılarak bentonitin plastisite indeksi (I_p) hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; bentonitin ortalama likit limit değeri % 240.2, plastik limiti % 57.4 ve plastisite indeksi ise % 182.8 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. Bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriğini (w_{opt}) gösteren kompaksiyon eğrisi.

Figure 2. The compaction curve of bentonite showing the maximum dry unit weight (γ_{kmax}) and optimum water content (w_{opt}).

Çizelge 3. Kullanılan bentonitin Atterberg sınırları değerleri.

Table 3. Atterberg limit values of the used bentonite.

Atterberg sınırları	Değerler
Likit limit (%)	240.2
Plastik limit (%)	57.4
Plastisite indeksi (%)	182,8

Şişme

Söz konusu bentonitin şişme yüzdesini belirlemek amacıyla optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde ASTM D – 4546 (1994) standartlarına uygun olarak şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında, 0.07 kg/cm² yük altında suya doyurulan 7.5 cm çaplı numunenin maksimum hacimsel şişmesi sağlanmıştır. Deney sonunda

elde edilen numune yüksekliğinin ilksel numune yüksekliğine oranı ile şişme yüzdesi (%S) elde edilmiştir. Buna göre söz konusu bentonitin şişme yüzdesi % 65 olarak bulunmuştur.

Dayanım

Bentonit kilinin dayanımının belirlenmesi amacıyla ASTM- D 2166 (1994) standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri (UCS) yapılmıştır. Deney kapsamında optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerden alınan 99 mm yükseklikte ve 49.4 mm çaplı örnekler üzerinde yenilme gerçekleşinceye kadar 1 mm/dk sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Bu deney üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve ortalama değer kaydedilmiştir (Şekil 3). Deney sonuçları Çizelge 4’de sunulmuştur. Deney sonuçlarının ortalaması alındığında kullanılan bentonitin serbest basınç dayanımı 57.1 kPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 4. Kullanılan bentonite ait UCS sonuçları.

Table 4. UCS values of the used bentonite.

Deney No	F, Yenilme anında yük (kg)	A, Yüzey alanı (cm ²)	σ , Gerilme (kg/cm ²)	σ , Gerilme (kPa)
1	10.9	19.156	0.574	56.3
2	11.1	19.156	0.581	57.0
3	11.3	19.156	0.591	58.0

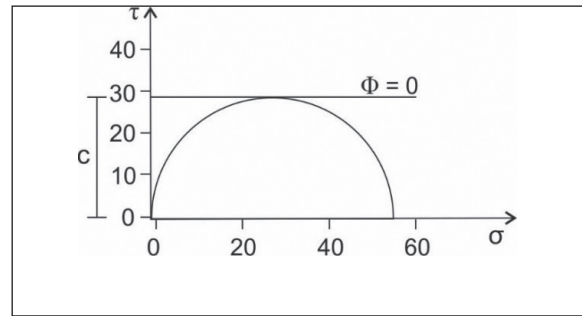
Ayrıca, yenilme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma dayanımı zarfı çizilerek örneğin kohezyon değeri

bulunmuştur. Buna göre çalışmada kullanılan bentonitin içsel sürtünme açısı (Φ) = 0 ve kohezyonu (c) = 28.6 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 4).



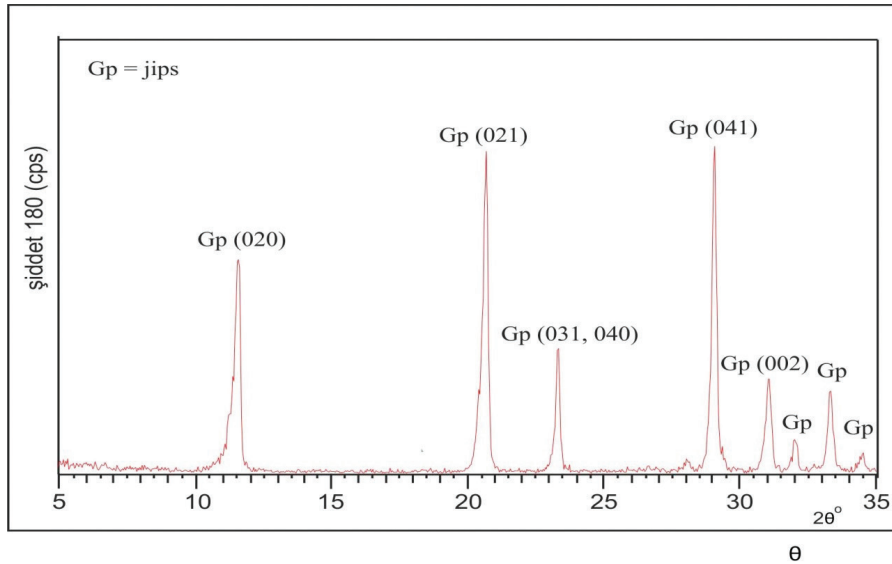
Şekil 3. UCS deneyi gerçekleştirilen numuneler.

Figure 3. The samples tested by UCS.



Şekil4. Mohr dairesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi.

Figure 4. The Mohr circles and the evaluation of the results.



Şekil 5. Kullanılan jipse ait karakteristik XRD difraktogramı.

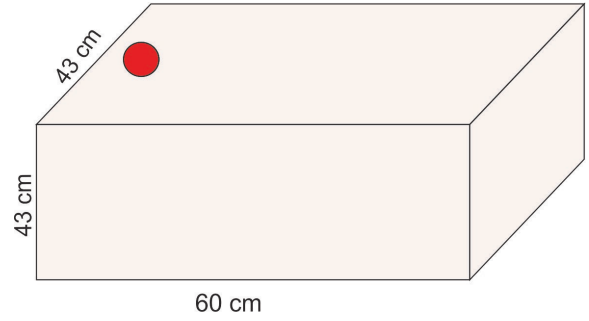
Figure 5. Characteristic XRD graph for the used gypsum.

Laboratuvar Modelinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında laboratuvar model oluşturularak şişen zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolonun performansı araştırılmıştır. Laboratuvar modelinin oluşturulması amacıyla ilk olarak bentonit karıştırıcı kazanda optimum su içeriğinde karıştırılarak deney numunesi elde edilmiştir. Elde edilen deney numunesi 43 cm x 60 cm x 43 cm boyutunda çelik bir kasa içerisinde benzinli taşınabilir tokmak (zıp zıp) yardımı ile 3 katman halinde sıkıştırılmıştır. Ardından, kasanın kısa kenarına yakın bir noktada 50 mm çapında bir delik açılmıştır. Bu deliğe jips doldurularak jips kolonu oluşturulmuştur. Nem kaybı ve dolayısı ile su içeriği değişimini engellemek amacıyla modelin üzeri jeotekstille hava ile temasını engelleyecek biçimde kapatılmıştır. Oluşturulan laboratuvar modeli ve modelin kesiti sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla yapılan kolon uygulaması ile ilgili çalışmalarda kür süresinin 28 gün ve 2 yıl arasında olması

gerektiği önerilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada kür süresi 3 ay olarak seçilmiştir. Oluşturulan modelde kür süresi boyunca kolondan su girişi sağlanarak jipsin kolonu çevreleyen zemine göç etmesi sağlanmıştır. Bu amaçla plastik bir boruda düzenli aralıklarla delikler açılmış ve borunun çevresi filtre kağıdıyla kaplanmıştır. Hazırlanan boru jips kolonunun merkezine yerleştirilerek su girişi sağlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 6. Oluşturulan laboratuvar modelinin kesiti.

Figure 6. The cross-section of the designed laboratory model.



Şekil 7. Oluşturulan laboratuvar modeli.

Figure 7. The designed laboratory model.

3 aylık kür süresi sonunda laboratuvar modelinin üzeri açılarak jips kolonunun performansını incelemek amacıyla kolondan itibaren artan mesafelerde örselenmemiş örnekler alınmıştır. Örnek alım düzeni Şekil 9 ve Şekil 10' da verilmiştir.

Alınan örnekler üzerinde serbest basınç deneyi, serbest şişme deneyi ve Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Ayrıca suyun zemin içerisindeki göç mesafesini gözlemlemek amacıyla alınan örneklerin su içeriği değerleri belirlenmiştir. Buradaki temel gerekçe, jips içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine suyun akışı yardımıyla göç etmesi şeklinde bir hareketin sağlanmasına yöneliktir. Dolayısıyla, su içeriğindeki değişimler incelenerek jipsin göç mesafesine yönelik olarak da yaklaşımlarda bulunulabilir.



Şekil 10. Laboratuvar modelinden örnek alım düzeni.

Figure 10. The sampling order from the laboratory model.

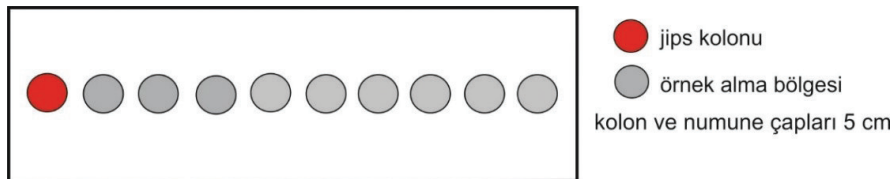


Şekil 8. Modele su girişinin sağlanması.

Figure 8. Water inlet to the model.

BULGULAR

Jips kolonundan itibaren değişik mesafelerde alınan örnekler üzerinde yapılan Atterberg limitleri deneylerinin sonuçları Çizelge 5' de sunulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, zeminin likit limit değeri kolondan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde % 240.2' den % 205' e düşerken plastik limit değeri % 57.4' den % 52' ye azalmıştır. Bu mesafeden sonra ise, iyileştirilmemiş zeminin likit limit ve plastik limit değerine yakın değerler gözlenmiştir.



Şekil 9. Laboratuvar modelinden örnek alım düzeninin kesiti.

Figure 9. The cross-section of the sampling order from the laboratory model.

Çizelge 5. Jips kolonundan itibaren alınan numunelere ait Atterber limitleri değerleri.

Table 5. Atterberg limit values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Likit Limit (LL)	205	238	236	241	243	240	238	242	240
Plastik limit (PL)	52	62	57	60	60	61	58	59	59
Plastisite İndeksi (Ip)	153	176	179	181	183	179	180	183	181

Şekil 11’de zeminin plastisite indeksi değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere zeminin plastisite indeksi değerinde kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafe içerisinde azalma gözlenirken bu mesafeden sonra tekrar bir artış başlamıştır ve değerler neredeyse sabit bir seyir izlemiştir.

Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri Çizelge 6’ da verilmiştir.

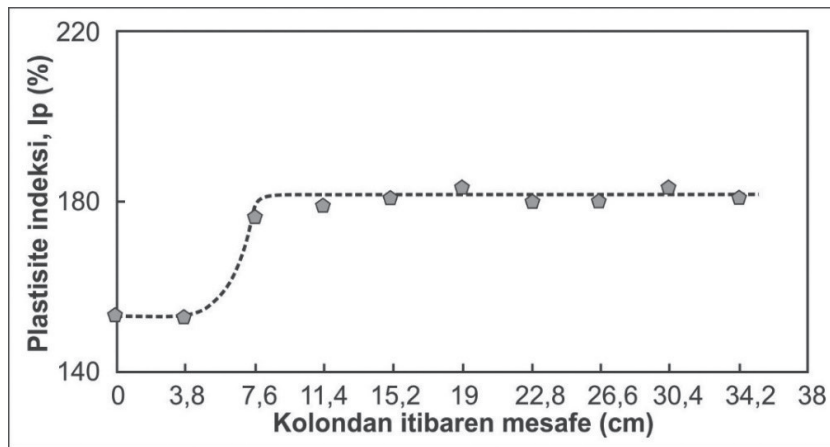
Daha önceden de belirtildiği üzere iyileştirilmemiş zeminin tek eksenli basınç dayanımı 57.1 kPa olarak bulunmuştu. Çizelge 6’ da verilen sonuçlar incelendiğinde ise zeminin serbest basınç dayanımı değerinin 3.8 cm’ lik bir mesafe içerisinde 66.5 kPa’ a yükseldiği görülmektedir. Ancak, bu mesafeden sonra tekrar azalarak sabit bir değer seyretmiştir.

Serbest basınç dayanımı değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi Şekil 12’de sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere

Çizelge 6. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri.

Table 6. Uni-axial compressive strength and cohesion values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
UCS (kPa)	66.5	58.8	57.1	59.0	57.0	56.4	56.1	58.9	56.7
Kohezyon (kPa)	33.2	29.4	28.6	29.5	28.5	28.2	28.0	29.4	28.3

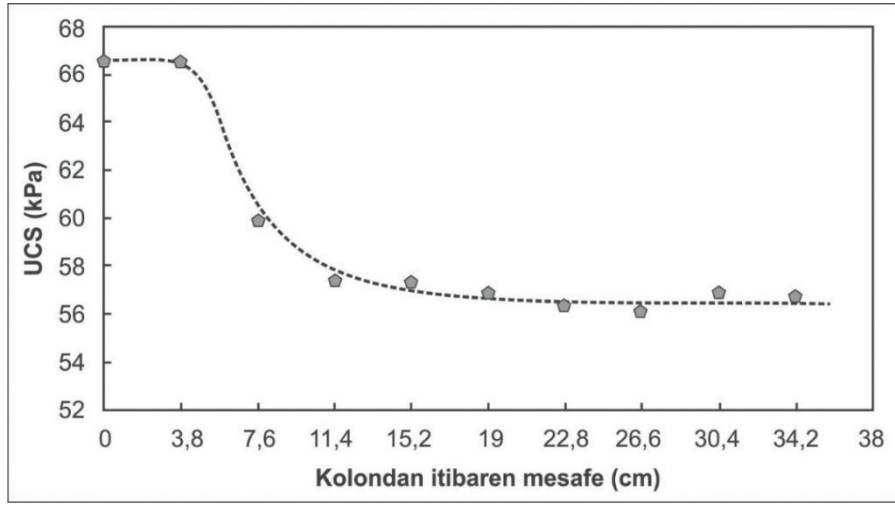


Şekil 11. Plastisite indeksi değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile olan değişimi.

Figure 11. The changes on the plasticity index depending on the distance from gypsum column.

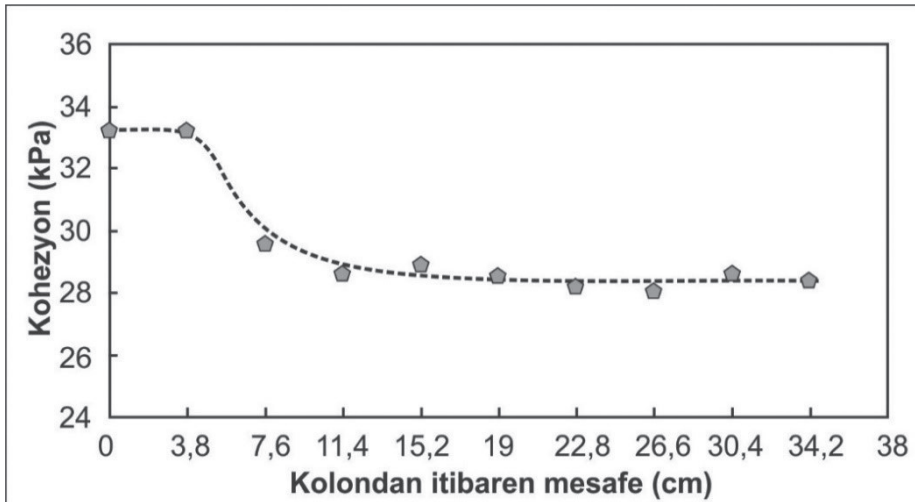
zeminin tek eksenli basınç dayanımı değeri kolondan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde artmakta, bu mesafeden sonra tekrar azalmakta ve iyileştirilmemiş zeminin tek eksenli basınç dayanımına yakın sonuçlar vererek devam etmektedir.

Ayrıca örneklerin kohezyon değerleri incelendiğinde ise, yine kolondan itibaren 3.8 cm'lik mesafe içerisinde 28.55 kPa'dan 33.2 kPa' a yükseldiği, ancak bu mesafeden sonra tekrar azaldığı gözlenmiştir. Kohezyon değerinin kolondan itibaren değişimi Şekil 13' de verilmiştir.



Şekil 12. Gips kolonundan itibaren tek eksenli basınç dayanımındaki değişim.

Figure 12. The changes on the uni-axial compressive strength depending on the distance from gypsum column.



Şekil 13. Gips kolonundan itibaren kohezyon değerlerindeki değişim.

Figure 13. The changes on cohesion depending on the distance from gypsum column.

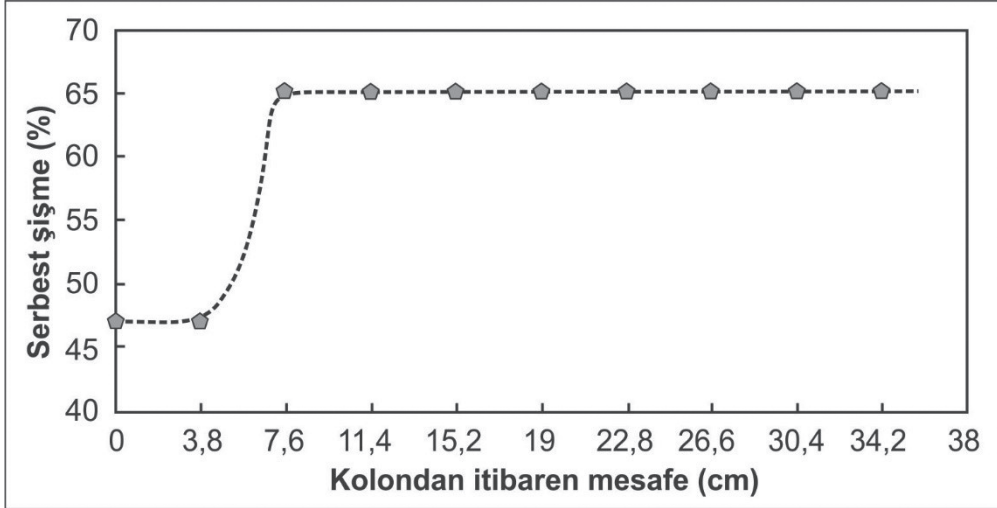
Zeminin serbest şişme değerindeki değişimler incelendiğinde iyileştirilmemiş zeminin serbest şişme değeri % 65 olarak ölçülmüştür. Çizelge 7’ de verilen sonuçlar incelendiğinde ise, zeminin şişme değerinin kolondan itibaren 3.8 cm’lik mesafe içerisinde % 47’ye düştüğü görülmektedir.

Zeminin serbest şişme değerlerinin jips kolonundan itibaren olan mesafe ile değişimi ise Şekil 14’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafe içerisinde zeminin şişme değerinde bir azalma gözlenmektedir. Bu mesafeden sonra yine artışın olduğu sabit bir seyir izlemiştir.

Çizelge 7. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest şişme değerleri.

Table 7. Free swelling values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Serbest şişme (%)	47	65	65	65	65	65	65	65	65



Şekil 14. Jips kolonundan itibaren serbest şişmedeki değişim.

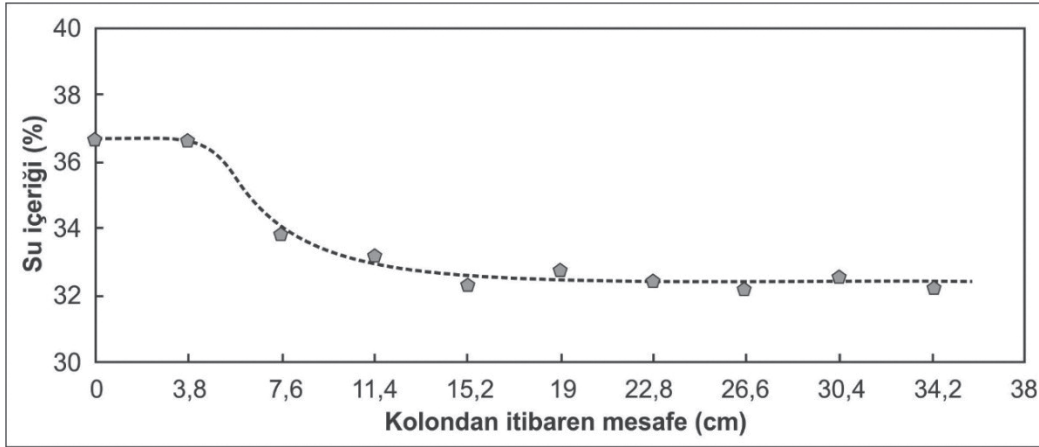
Figure 14. The changes on the free swelling depending on the distance from gypsum column.

Çizelge 8. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin su içeriği değerleri.

Table 8. Water content values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Su içeriği (%)	37	34	34	32	33	32	32	33	33

Jips içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine olan göç mesafesine yaklaşımda bulunabilmek amacıyla hesaplanan su içeriği değerleri Çizelge 8’ de sunulmuştur. Ayrıca su içeriğinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi Şekil 15’ de verilmiştir. Su içeriğindeki değişimler incelendiğinde, diğer deney sonuçlarını doğrulayacak biçimde, kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafede yüksek su içeriği değeri gözlenirken bu mesafeden sonra azalarak sabit bir seyir izlemektedir. Dolayısıyla, jips içerisindeki iyonların ancak bu mesafeye kadar göç edebildiği sonucuna varılabilir.



Şekil 15. Jips kolonundan itibaren su içeriğindeki değişim.

Figure 15. The changes on the water content depending on the distance from gypsum column.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında killerin iyileştirilmesinde jips kolonu tekniğinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvar ölçekli bir model oluşturularak jips kolonundan itibaren değişik mesafelerde kilin fiziksel, şişme ve dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve tartışılmıştır.

1. Jips kolonundan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde, deneyde kullanılan kilin likit limit değerinde % 240.2' den % 205' e, plastisite indeksi değerinde ise % 182.8' den % 153' e bir düşüş gözlenmiştir. Plastisite indeksi ve likit limit değerlerindeki düşüşün sebebi kildeki tek değerlikli sodyum iyonlarının jipsin içerisindeki kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirmesi ile meydana gelen çift tabaka kalınlığındaki azalma şeklinde yorumlanmıştır. Plastisite indeksi ve likit limit değerinde bir düşüş gözlenmesine rağmen zemin hala CH sınıfındadır. Dolayısıyla sınırlı bir iyileştirme söz konusudur. 3.8 cm' lik mesafeden sonra kilin plastisite indeksi ve likit limit değerleri

tekrar artmış ve iyileştirilmemiş kilin plastisite indeksi ve likit limit değerlerine yakın değerlerde seyretmiştir.

- Jips kolonundan itibaren yine 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde kilin şişme yüzdesinin % 65' den % 47' ye düştüğü gözlenmiştir. Bu mesafeden sonra şişme değerlerinde tekrar bir artış olmuş ve iyileştirilmemiş kilin şişme değerine yakın bir seyir izlemiştir. Kilin şişme yüzdesinde meydana gelen azalmanın sebebi, kil içerisindeki Na^+ iyonlarının jipsin içerisindeki Ca^{2+} iyonu ile yer değiştirmesi sonucu Na-montmorillonitin, Ca-montmorillonite dönüştürülmesi nedeniyledir. Bilindiği üzere, Na-montmorillonit Ca-montmorillonite oranla oldukça fazla şişme özelliği göstermektedir. Şişme yüzdesindeki bu düşüşün kolondan itibaren sadece 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde gözlenmesi, Ca^{2+} iyonunun ancak bu mesafeye kadar göç edebildiğini göstermektedir.
- Kilin dayanımındaki değişimler incelendiğinde, serbest basınç dayanımının kolondan itibaren 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde 57.1 kPa'dan 66.5 kPa'a yükseldiği gözlen-

miştir. Bu mesafeden sonra ise serbest basınç dayanımı tekrar azalarak sabit bir seyir izlemiştir.

4. Jips kolonundan itibaren kilin su içeriği değerlerinde ilk 3.8 cm' lik mesafeden sonra düşüş gözlenmiştir. Su içeriğinin bu mesafeden sonra düşmesi suyun ancak bu mesafeye kadar ulaşabildiğini ifade etmektedir. Yapılan literatür araştırmalarına göre killi zeminlerde iyon göçünün olabilmesi için suyun varlığı gerekmektedir. Dolayısıyla, jips içerisindeki Ca^{2+} iyonunun göçü suyun ulaşabildiği alanla sınırlı kalmıştır.
5. Kile ait ölçülen bütün özellikler jips kolonundan itibaren 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla, iyileştirme kolon çapının % 76' sı diğer bir deyişle kolon çapının 0.76 katı kadar bir mesafe içerisinde sağlanabilmiştir. Bu iyileştirme mesafesi zemin iyileştirme çalışmalarında arzu edilen bir mesafe değildir. İyileştirme mesafesinin bu kadar düşük çıkmasının sebepleri incelendiğinde en önemli sebebin Ca^{2+} iyonunun daha fazla mesafelere geçememesi şeklinde yorumlanabilir. Bunun en önemli sebebi ise kullanılan bentonitin çok düşük geçirimsiliğe sahip olmasından dolayı suyun zemin içerisindeki akışının sağlanamamasıdır. Dolayısıyla, daha yüksek geçirimsiliğe sahip sorunlu bir zemin kullanıldığı takdirde daha büyük göç mesafeleri sağlanabilir ve daha iyi kolon performansı elde edilebilir. Sonuç olarak, jips kolonun performansı kullanılan zeminin özelliklerine de bağlıdır. Ayrıca, kolon çapı ve kür süresi de kolon performansını etkileyen faktörler arasındadır. Daha büyük kolon çapları kullanılarak ya da daha fazla

bir kür süresi seçilerek daha iyi sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Ancak, bu yaklaşımların deneysel verilerle desteklenmesi de gerekmektedir. Dolayısıyla, yukarıdaki yaklaşımların desteklenmesi için daha ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirilerek deneysel veriler elde edilmelidir.

6. Zemin iyileştirme çalışmalarında her ne kadar kireç diğer katkı maddelerine oranla daha yaygın olarak kullanılıyor olsa da jipsin yaygın olarak bulunması ve kirece göre 2-3 kat daha ucuz olması, jipsle yapılan iyileştirme çalışmalarında önemli bir avantaj oluşturmaktadır.
7. Jips kolonu ile yapılan iyileştirme çalışmalarında jipsin yeraltı suyu kirliliğine sebep olabileceği göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, jipsin beton yapılarla temas edebileceği durumlarda sülfat etkisine dirençli çimento kullanımına da gerek duyulabilir.

KAYNAKLAR

- Abiodun, A.A., Nalbantoglu, Z., 2015. Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 760-768.
- Akawwi, E., Kharabsheh, A., 2000. Lime stabilization effects on geotechnical properties of expansive soils in Amman, Jordan. *Journal of Geotechnical Engineering*, 5, 201-210.
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S., Alcover, J.S., 2012. Microstructure and Geotechnical Properties of Lime-Treated Expansive Clayey Soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27.
- Ameta, N.K., Prohit, D.G.M., Wayal, A.S., Sandeep, D., 2007. Economics of stabilizing bentonite soil with lime-gypsum. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 12, Bundle E.

- Amu, O.O., Fajobi, A.B., Afekhuai, S.O., 2005. Stabilizing potential of cement and fly ash mixture on expansive clay soils. *Journal of Applied Sciences*, 5, 1669-1673.
- ASTM D-698, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- ASTM D-4546, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- ASTM-D 2166, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- Basma, A.A., Al-Rawas, A., Al-Saadi, S.N., Al-Zadjali, T.F., 1998. Stabilization of expansive clay in Oman. *Environmental and Engineering Geoscience*, 4, 503-510.
- Bell, F.G., Maud, R.R., 1995. Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: a viewpoint from Natal, South Africa. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1, 41-59.
- BS 1377, 1975. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standards Institution, London.
- Brandl, H., 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 587-594.
- Broms, B., Boman, P., 1979. Lime columns-a new foundation method. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105, 539-556.
- Çetiner, S.I., 2004. Şişen zeminlerin Çayırhan uçucu külü ve desülfojips ile stabilizasyonu, yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 107 s.
- El-Rawi, M.N., Awad, A.A.A., 1981. Permeability of lime stabilized soils. *Journal of Transportation Engineering Division, ASCE*, 107, 25-35.
- Ferguson, G., 1993. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, fly ash for soil improvement. *Geotechnical Special Publication*, 36, 1-15.
- FIPR (Florida Institute of Phosphate Research), 1988. Stabilization of phosphatic clay with lime columns. Report prepared by Bromwell and Carrier Inc. under a grant sponsored by the Florida Institute of Phosphate Research, Bartow-Florida, 102 p.
- Garzón, E., Cano, M., O'Kelly, B.C., Sánchez-Soto, P., 2016. Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, 329-334.
- Gillson, J.L., 1960. *Industrial Minerals and Rocks*. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, 596 p.
- Gyanen, T., Savitha, A.L., Gudi, K., 2013. Laboratory study on soil stabilization using fly ash mixtures. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. Volume 2, Issue 1.
- Handy, R.L., Williams, N.W., 1967. Chemical stabilization of an active landslide. *Civil Engineering*, 37, 62-65.
- Holm, G., Broms, B.B., 1981. Lime columns as foundation for light structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm, 3, 687-694.
- Ji-ru, Z., Xing, C., 2002. Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition*, 17, 73-77.
- Jones, D.E., Holtz, W.G., 1987. The prediction and performance of structures on expansive soils. *ASCE, Civil Engineering*, 43, 87-89.
- Kitsugi, K., Azakami, H., 1982. Lime-column techniques for the improvement of clay ground. *Proceedings of the Symposium on recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, 1982, 105-115.
- Küçükali, Ö., 2011. Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 75 s.

- Locat, J., Berube, M.A., Choquette, M., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 294-304.
- Mathew, P.K., Narasimha, R.S., 1997. Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123, 183-185.
- Murray, H.H., 1991. Overview-clay mineral applications. *Applied Clay Science*, 5, 379- 395.
- Nalbantoğlu, Z., Güçbilmez, E., 2001. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 47, 453-463.
- Okagbue, C.O., Onyeobi, T.U.S., 1999. Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. *Engineering Geology*, 53, 371-380.
- Popescu, M.E., Constantinescu, T., Ferrando C., Quintavalle, F., 1997. Treatment of subgrade expansion soil at the extension of Bucharest-Otopeni International Airport. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Athens, Greece, 331-338.
- Singh, S. P., Roy, N. Sangita, S., 2017. Strength and hydraulic conductivity of sedimented ash deposits treated with lime column. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11, 3-15.
- Tystovich, N.A., Abelev, M.Yu, Takhirov, I., 1971. Compacting saturated loeses soils by means of lime piles. *Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics*, Budapest, 837-842.
- Terashi, M., Tanaka, H., Niidome, Y., Sakanoi, H., 1980. Permeability of treated soils. *Proceedings, 15th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 773-776.
- Townsend, D.C., Kylv, T.W., 1966. Durability of lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, 139, 25-41.
- Transportation Research Board, 1987. Lime stabilization: reaction, properties, design and construction. *Committee on Lime and Lime-fly ash Stabilization, State-of-the-Art-Report*, 5, Washington, D.C., 1-59.
- Tonoz, M.C., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 2003. A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, 91-106.
- Van Impe, W.F., 1989. *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. A.A. Balkema, Rotterdam, 125 pp.
- Vitale, E., Deneele D., Paris, M., Russo, G., 2017. Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays. *Applied Clay Science*, 141, 36-45.
- Yılmaz, I., Karacan, E., 1997. Geotechnical properties of alluvial soils: an example from south of Sivas (Turkey). *IAEG Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55, 159-165.
- Yılmaz, I., 2007a. *Mühendislik Jeolojisi – İlkeler ve Temel Kavramlar*, Teknik Yayınevi, Ankara, 490 s.
- Yılmaz, I., 2007b. The effect of swelling clays on a water transport canal between Köklüce HPP and Erbaa HPP (Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 467-472.
- Yılmaz, I., Civelekoğlu, B., 2009. Gypsum: An additive for stabilization for swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44, 166-172.
- Zhu, F., Li, Z., Dong, W., Ou, Y., 2018. Geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized silt clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Doi: 10.1007/s10064-018-1307-5.