

ŞİŞEN ZEMİNLERİN SİLİS DUMANI VE KİREÇ KULLANILARAK STABİLİZASYONU

STABILIZATION OF AN EXPANSIVE CLAY USING LIME AND SILICA FUME

Hayri GÜZEL¹, Erdal ÇOKÇA²

ÖZET

Şişen kil sorunu, küresel bir problemdir. Bu kil türleri suya maruz kaldığında şişme gösterir ve kurduğunda büzülür. Bu kil türlerini stabilize etmek için yaygın ve maliyet etkin yaklaşım, hacimsel değişiklikleri etkin bir şekilde azaltan katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Bu çalışmada, kireç ve silis dumanı'nın şişen kilin şişme potansiyelini azaltma ve drenajsız kayma mukavemetini artırma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şişen kil, laboratuvarda kaolinit ve bentonit karıştırılarak hazırlanmıştır. Şişen kil, farklı ağırlık yüzdelerinde silis dumanı (SF) ve kireç (L) ile iyileştirilmiştir. Dane büyüklüğü dağılımı, kıvam limitleri, kompaksiyon karakteristikleri, şişme yüzdesi ve serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Numuneler, 7 ve 28 gün kürlere tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma, laboratuvar koşullarında hazırlanan şişen kil numunelerinin şişme potansiyeli ve serbest basınç mukavemetleri üzerinde silis dumanı ve kirecin etkisini ortaya koymuştur. Araştırma bulguları, silis dumanı ve kirecin, şişen kilin şişme potansiyelini azalttığını ve drenajsız kayma mukavemetini artırdığını göstermektedir. Kireç, kil ve silis dumanı arasındaki reaksiyonlar dağınık çift tabaka DDL kalınlığını azaltmakta, CSH bileşiklerinin oluşmakta ve sonuç olarak, şişen kilin şişme potansiyeli azalmakta ve drenajsız kayma mukavemeti artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Şişen Kil, Kireç, Silis Dumanı, Zemin Stabilizasyonu, Mukavemet, Şişme Potansiyeli.

ABSTRACT

The issue of expansive clays is a global concern. When exposed to water, these types of clays exhibit swelling and undergo shrinkage upon drying. The prevailing and cost-effective approach to stabilize these clays involves the utilization of admixtures that effectively mitigate volumetric alterations. This study aims to investigate the impact of incorporating lime and silica fume on mitigating the swelling potential and improving the undrained shear strength of expansive clays. Preparation of the expansive clay has been done in the

¹ İnş.Y.Müh., ODTÜ, hayri.guzel@metu.edu.tr

² Prof., ODTÜ, ecokca@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)



laboratory by mixing kaolinite and bentonite. The expansive clay has been modified with silica fume (SF) and Lime (L) at different weight percentages. The determination of grain size distribution, consistency limits, compaction characteristics, swelling percentage, and unconfined compressive strength of the mixtures have been conducted. The specimens have been undergoing a curing process ranging from 7 and 28 days. The experimental study revealed the impact of silica fume and lime on the swelling potential and unconfined compression characteristics of artificially prepared expansive clay specimens under laboratory conditions. The research findings show that the addition of lime and silica fume to the expansive clay decreased the swelling potential and increased the undrained shear strength of the expansive clay due to the cation exchange reactions and decrease of diffuse double layer DDL thickness and formation of cementitious CSH compounds due to the pozzolanic reactions between Ca of lime and Si of clay and silica fume.

Keywords: Expansive Clay, Lime, Silica Fume, Soil Stabilization, Strength, Swelling Potential,

1. GİRİŞ

Şişen kil sorunu, küresel bir problemdir. Eğer önlem alınmazsa doğal afet riski oluştururlar ve yapıların önemli ölçüde zarar görmesine neden olabilirler. Bu tür kil, suya maruz kaldığında şişer ve kurduğunda büzülür. Zemine giren suyun kaynağı, su sızıntısı, aşırı yağışın sel baskınlarına yol açması, boru veya kanalizasyon hatlarından su sızması veya binaların veya kaldırımların varlığı nedeniyle yüzey buharlaşmasının azalması gibi çeşitli faktörlerden dolayı olabilir. Silis dumanının (SF'nin) zemini iyileştirme amaçlı olarak hem yalnız başına hem de diğer katkı maddeleri ile kombinasyon halinde etkinliğini değerlendirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Bulgular, SF'nin geoteknik özellikler üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir (Goodarzi vd., 2016; Kalkan & Akbulut, 2004; Phanikumar vd., 2020; Qing vd., 2020). Puzolanlar, doğal ve doğal olmayan puzolan, silis dumanı, uçucu kül, ve diğer benzer maddeler de dahil olmak üzere silisli veya silisli ve alüminyumlu bileşimleri ile karakterize edilen çeşitli malzemeler grubunu oluşturur. Bununla birlikte, tek başlarına düşünüldüğünde, bunların çimentolaşma özellikleri çok az veya hiç yoktur. Ayrıca, silis dumanı ve kireç kombinasyonunun, bunların tek başlarına kullanımına kıyasla daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Kirecin eklenmesi stabilizasyonun etkinliğini önemli ölçüde artırır. Birçok çalışma (Abd El-Aziz vd., 2004; Alrubaye vd., 2017; Fattah vd., 2015) katkı maddelerinin birlikte kullanımının problemlili zeminlerin şişme ve dağılma özelliklerinde iyileştirme sağladığını rapor etmiştir. Bu çalışmalarda, kayma dayanım parametrelerinde ve işlenebilirlikte önemli iyileştirmelerin olduğu bulunmuştur.

1.1. Şişen Killerin Stabilizasyonu

Kireç Stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonu için kireç kullanımı hakkında, çeşitli araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Plastik ve likit limitleri gibi kıvam limitleri değerleriyle bağlantılı çalışmaların yanı sıra hacimsel değişim (örneğin, şişme potansiyeli, şişme basıncı), kayma mukavemeti ve kireçle iyileştirilmiş şişen zeminlerde geçirgenlik katsayısı dahil olmak üzere, zemin özelliklerindeki değişimi araştırmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır.

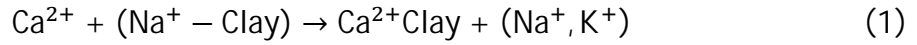


Kireç Stabilizasyon Mekanizmaları

Kireçle şişen kilin iyileştirilmesi için stabilizasyon mekanizmaları iki aşamaya ayrılabilir: ilk aşamada katyon değişimi, flokkülasyon ve aglomerasyon reaksiyonları gerçekleşir ve ikinci aşamada, puzolanik reaksiyonlar ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alüminat-hidrat (C-A-H) gibi çimento ürünlerinin oluşumuyla uzun vadeli dayanım kazanımı gerçekleşir.

Katyon Değişimi

ilk aşamada, stabilizasyon maddesinden (kireç) gelen kalsiyum iyonlarının, kil parçacıklarının yüzeyinde bulunan sodyum (Na⁺) ve potasyum (K⁺) vb iyonlarla yer değiştirmesini içerir. Tek değerlikli katyonların kalsiyum gibi daha büyük değerlikli katyonlarla kolayca değiştirilebileceği bilinmektedir (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Bir katyon değişimi örneği aşağıda gösterilmiştir:

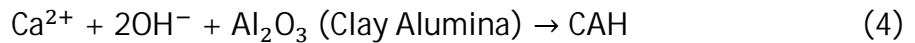
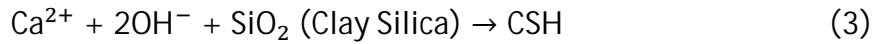


Flokkülasyon ve Aglomerasyon

Katyon değişim reaksiyonları, kil partiküllerinin etrafındaki dağınık çift tabaka kalınlığının azalmasına ve zemin partiküllerinin flokkülasyon ve aglomerasyonuna yol açar, bu da kil boyutlu malzemelerin miktarında azalmaya ve dolayısıyla zemin yüzey alanında azalmaya neden olur.

Puzolanik Reaksiyonlar

Puzolanik reaksiyon, zemin iyileştirme görülen ikinci fazdır. Hem kireç hem de çimento-zemin etkileşimleri için geçerlidir. Kalsiyumla stabilize edilmiş bir sistemdeki alkali koşullar, kil parçacıklarının bileşenleri olan silika ve alüminanın çözünürlüğünü ve reaktivitesini artırır. Kalsiyum iyonlarının, kil yapısından salınan silika ve alümina ile reaksiyona girerek kalsiyum silika hidratlar, CSH ve kalsiyum alümina hidratlar, CAH gibi ek, çimentolu maddelerin oluşmasına neden olduğunu bilinmektedir. Bu, topaklaşma sürecinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunur (Prusinski ve Bhattacharya, 1999). Zemin-kireç reaksiyonları için aşağıdaki basit açıklayıcı örnek verilebilir.



Reaksiyon koşullarına, yani kirecin miktarına ve türüne, zemin özelliklerine, kürlenme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak hidrat formları (CSH, CAH) elde edilebilir.

1.2. Silis Dumanı (SF) Stabilizasyonu

Silis Dumanının Özellikleri

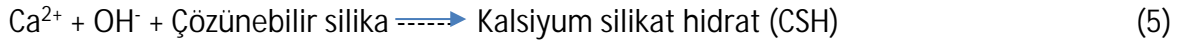


Şişen zeminlerin silis dumanı ve kireç kullanılarak stabilizasyonu

SF'deki SiO₂ içeriği, çeşitli kaynaklara göre yaklaşık %90 ile %96 arasında değişmektedir, bu SiO₂ esas olarak kuvars formunda bulunur. Silis (Silika) dumanı tipik olarak toz halinde bulunur. Silis dumanı (SF), düşük birim ağırlık, nispeten düşük sıklık özellikleri ve önemli puzolanik aktivite özellikleri nedeniyle problemlili zeminleri iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (Goodarzi ve ark., 2016).

Silis Dumanının Stabilizasyon Mekanizması

Amorf silika dioksit (SiO₂), SF'de bulunan baskın oksittir ve onu bir puzolanik madde olarak sağlar (Fattah ve diğ., 2015; Goodarzi ve diğ., 2016). Kalsiyum hidroksit ile kalsiyum silikat hidrat jelleri (CaSiO₃.H₂O) oluşur. Kildeki temel silis dumanı-kalsiyum etkileşimini tanımlamak için aşağıdaki denklem verilebilir:



Yukarıdaki reaksiyon neticesinde oluşan kalsiyum silikat hidrat, kilin iyileştirilmeden önceki durumuna göre mukavemetini arttırmakta ve şişme yüzdesini azaltmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Amaç

Bu çalışmada, şişen kile, kireç ve silis dumanının eklenmesinin tane büyüklüğü dağılımı, kıvam limitleri, kabarma yüzdesi ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelemiştir ve ayrıca kürün, şişme yüzdesi ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2.2. Malzemeler

Kaolin, bentonit, kireç ve silis dumanı, deneylerde kullanılmadan önce, 40 numaralı elekten elenmiş ve 40°C' de fırında kurutulmuştur.

Deneylerde kullanılan kaolin, bentonit, kireç ve silis dumanının kimyasal bileşimleri üreticilerinden temin edilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

2.3. Şişen Kilin Stabilizasyonu

Kireç Stabilizasyonu

Çeşitli araştırmacılar tarafından kirecin zemin stabilizasyonunda kullanımını üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Plastik ve likit limitler gibi kıvam limit değerleri ile zemin özellikleri arasındaki değişimleri incelemek için birçok çalışma yapılmıştır, bunlar arasında hacimsel değişim (örneğin, şişme potansiyeli), kayma dayanımı ve kireçle iyileştirilmiş şişen zeminlerde geçirgenlik katsayısı da bulunmaktadır.

Katkısız Numunenin pH'ı 8.88'dir. %3 kireç eklenmiş numunenin pH değeri, 12.46 dır, (pH 12.4'ün üzerinde ve puzolanik reaksiyonlar için optimum kireç içeriğini belirtmektedir). %5 kireç katkılı numunenin pH değeri 12.49 dur.



Tablo 1. Kaolinit, Bentonit, Kireç ve Silis Dumanının Kimyasal Bileşimleri

Kompozisyon (%)	Kaolin	Bentonit	Kireç	Silis dumanı
SiO ₂	47.89	61.28	<0.10	85-95
Fe ₂ O ₃	*	3.01	<0.10	0.5-1.0
Al ₂ O ₃	36.75	17.79	<0.10	1.0-3.0
MgO	0.09	2.1	0.9	1.0-2.0
CaO	0.39	4.54	95.55	0.8-1.2
Na ₂ O	0.01	2.7	*	*
K ₂ O	0.75	1.24	*	*
SO ₄	0.37	*	*	*
TiO ₂	0.61	*	*	*
C	*	*	*	0.5-1.0
S	*	*	*	0.1-0.3
Yanma kaybı	12.73	*	3.2	0.5-1.0

*Belirlenemedi

Kuru bileşenleri karıştırdıktan sonra, her bir numune standart proktor testine tabi tutulmuştur. Her bir numunenin maksimum kuru yoğunluğu ve optimum nem içeriği deneylerden elde edilmiştir. Daha sonra, numunelerin her biri maksimum kuru yoğunluk elde etmek için optimum su içeriği ile karıştırılmış ve numuneler daha sonra seramik kaplara konulmuş ve homojen su dağılımını sağlamak için en az 48 saat desikatör içinde bırakılmıştır.

Numunelerin kürlenmesi için, numuneler, karıştırma ve sıkıştırma prosedürlerini takiben 7 ve 28 gün süreyle kürlenmeye bırakılmıştır.

2.4. Numunelerin Özellikleri

Numunelerin özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Numunelerin indeks ve kompaksiyon özellikleri

Numune	%Kil	%silt	LL	PL	PI	Ac [%]	USCS	G _s	ρ _{dmaks} [g/cm ³]	Opt su içeriği [%]
Katkısız	56.8	43.2	106	31	75	1.321	CH	2.631	1.46	27.62
3% L	52.4	47.6	90	33	57	1.088	MH	2.625	1.45	25.85
3% L + 5% SF	53.5	46.5	99	32	67	1.253	CH	2.614	1.33	36.14
3% L + 10% SF	52.4	47.6	101	36	65	1.240	MH	2.604	1.34	33.78
3% L + 15% SF	50.6	49.4	97	35	62	1.225	MH	2.593	1.37	30.97
3% L + 20% SF	55.2	44.8	93	38	55	0.997	MH	2.582	1.31	35.87
5% L	50.5	49.5	90	33	57	1.130	MH	2.620	1.44	26.41
5% L + 5% SF	53.5	46.5	91	35	56	1.046	MH	2.610	1.33	33.72
5% L + 10% SF	53.9	46.1	95	38	57	1.057	MH	2.599	1.34	33.37
5% L + 15% SF	54.4	45.6	103	40	63	1.159	MH	2.589	1.36	31.45
5% L + 20% SF	52.4	47.6	104	43	61	1.163	MH	2.578	1.30	31.75

2.5. Katkıların Dane Büyüklüğü Dağılımına Etkisi



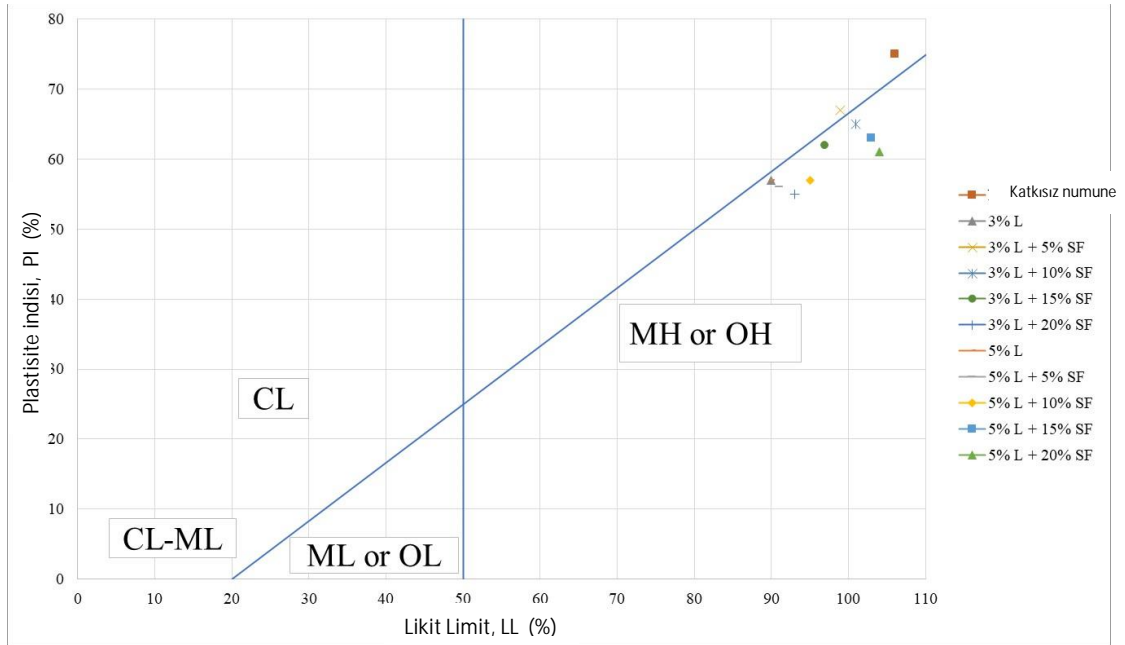
Şişen zeminlerin silis dumanı ve kireç kullanılarak stabilizasyonu

Katkıların eklenmesi, katkısız numunenin tane büyüklüğü dağılım eğrisini daha iri tarafa değiştirmiştir.

Katyon değişimi, DDL kalınlığında bir azalmaya neden olur ve zemin parçacıklarının topaklanmasına yol açarak kil büyüklüğündeki malzemelerin miktarında bir azalmaya ve sonuç olarak zemin yüzey alanında bir azalmaya neden olur, bu da plastisiteyi azaltır. Prusinski ve Bhattacharja'ya (1999) göre, topaklaşma süreçleri, kil bileşiminin plastik, ince daneli bir zeminden plastik olmayan, granüler bir zemine dönüşmesine neden olur.

2.6. Katkılarının Kıvam Limitlerine Etkisi

Katkıların eklenmesiyle, likit limit azaldığı ve plastik limit arttığı için plastisite indeksi düşmüştür (Tablo 2), zeminin işlenebilirliği artmış ve zemin sınıflandırması CH dan MH a değişmiştir (Şekil 1). Kireç ve silis dumanı şişen kile eklendiğinde, Ca^{2+} katyonları kilin Na^{+} katyonlarının yerini alır ve bunun sonucunda kilin dağılık çift tabaka (DDL) kalınlığı azalır.



Şekil 1 Numunelerin PI - LL abağında sınıflandırılması (USCS)

2.7. Katkılarının Aktivite Üzerindeki Etkisi

Aktivite değerleri, zeminin şişme eğiliminin değerlendirilmesinde faydalıdır. Hesaplanan aktivite sonucuna dayanarak, katkı maddesi içermeyen numune daha yüksek bir aktivite değerine sahiptir. Kireç ve silis dumanı ilavesiyle, numunelerin aktivite değerleri azalmıştır (Tablo 2).

2.8. Katkılarının Özgül Ağırlık Üzerine Etkisi, G_s

Kaolinit, bentonit, kireç ve silis dumanı için özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2.61, 2.75, 2.45 ve 2.41 tir. Katkısız numunenin özgül ağırlığı G_s 2.63 olarak belirlenmiştir. Kireç ve silis dumanının özgül ağırlığı, katkı maddesi içermeyen numunenin özgül ağırlığından daha



azdır. Sonuç olarak, kireç ve silis dumanı eklenerek oluşturulan numuneler, katkısız numuneye göre daha düşük özgül ağırlığa sahiptir (Tablo 2).

2.9. Katkılarının Maksimum Kuru Yoğunluğa ve Optimum Nem İçeriğine, w_{opt} etkisi

Standart proktor enerjisi ile yapılan kompaksiyon testlerinden elde edilen, katkı maddelerinin, optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk değerlerine ($\rho_{dry,maks}$) etkisi, Tablo 2'de gösterilmiştir, kireç ve silis dumanı ilavesiyle maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmış ve optimum su içeriği, w_{opt} değerleri artmıştır.

2.10. Serbest Şişme Deneyi

Numunenin Hazırlanması

Kuru numuneler optimum su içeriği miktarında karıştırılmış ve iki gün nem odasında bırakılmıştır. Bir gün desikatörde bekletilen numuneler, Tablo 2'te belirtildiği gibi maksimum kuru yoğunluk değerlerinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi, numunelerin hidrolik krikolar kullanılarak 19 mm yüksekliğinde ve 63 mm çapında bir kesme halkasında statik olarak sıkıştırılmasıyla yapılmıştır. Daha homojen bir şekilde sıkıştırılmış numunelere sahip olmak için, üç tabaka halinde sıkıştırma yöntemi uygulanmıştır.

Deney Prosedürü

Sıkıştırılan numunelerin şişme yüzdesini belirlemek için serbest şişme testi yöntemi kullanılmıştır. Serbest şişme testi yapılırken ASTM D4829 takip edilmiştir. ASTM D 4829'a göre numune odometre hücresine yerleştirilmiş ve 6.9 kN/m²'lik bir basınç uygulanmıştır ve daha sonra kil numunesinin şişmesi için su eklenmiş ve denge sağlanana kadar hacim artışı ölçülmüştür. Şişme yüzdesi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$S (\%) = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (6)$$

Burada:

S: Yüzde olarak şişme,

ΔH : Doygunluğa bağlı olarak numunenin yüksekliğinde (şişme) değişiklik,

H: Numunenin başlangıç yüksekliği.

Kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan çalışmalar için, sıkıştırılmış numuneler, nem odasında 7 ve 28 günlük süreler boyunca küre tabii tutulmuştur.

Deney Sonuçları

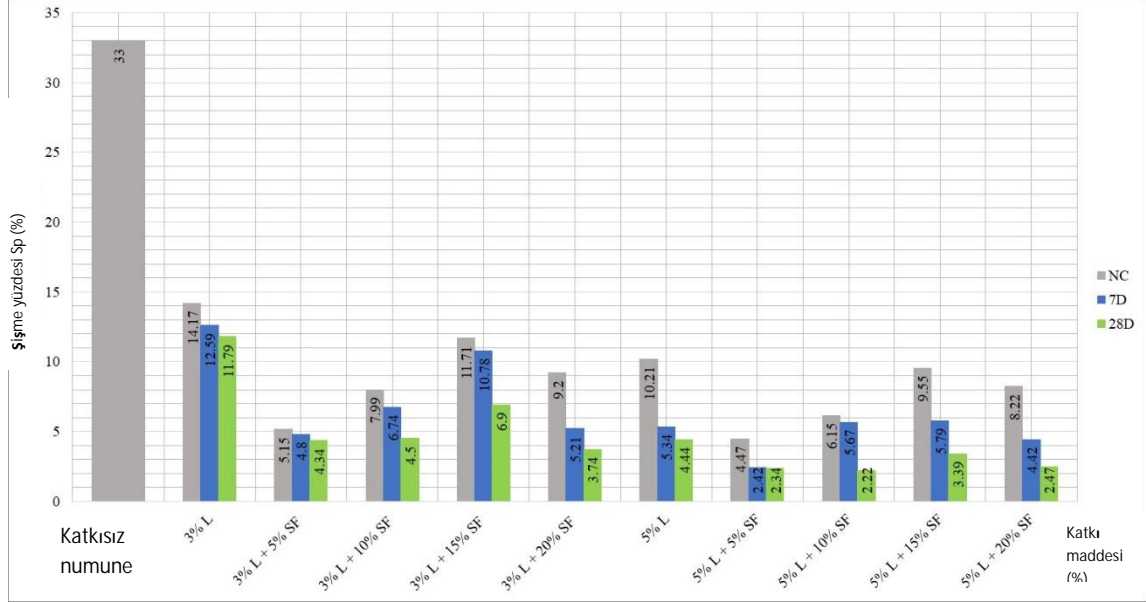
Katkı maddelerinin etkisini ve kürlenmenin etkisini gözlemlemek için, katkı maddesi içermeyen numunenin şişme yüzdesi, katkı maddeli numunelerin şişme yüzdeleri ve yüzde katkı maddesi Şekil 2'de sunulmuştur.

$$\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_{\text{kürsüz}} > \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_{7 \text{ gün kürlü}} > \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_{28 \text{ gün kürlü}} \quad (7)$$



Şişen zeminlerin silis dumanı ve kireç kullanılarak stabilizasyonu

Katkı maddelerinin eklenmesi, şişme yüzdesinde bir azalmaya neden olmuştur. %10 üzerinde silis dumanı eklendiğinde, şişme yüzdesinde bir artış görülmektedir.



Şekil 2. 0, 7, 28 gün kür durumları için numunelerin şişme yüzdeleri ve yüzde katkı maddeleri

2.11. Serbest basınç Deneyi

Numunenin Hazırlanması

Numunelerin boyutları, serbest basınç dayanımını deneyleri için 36 mm çapında ve 72 mm yüksekliğindedir.

Deney Prosedürü

Serbest basınç dayanımı testleri ASTM D2166'ya göre, Wykeham Farrance Trittech yükleme test cihazı ile yapılmıştır.

Deney Sonuçları

Drenajsız kayma mukavemeti c_u ($c_u = q_u/2$), yüzde katkı miktarı ve kütleme etkisi Şekil 3'de gösterilmektedir.

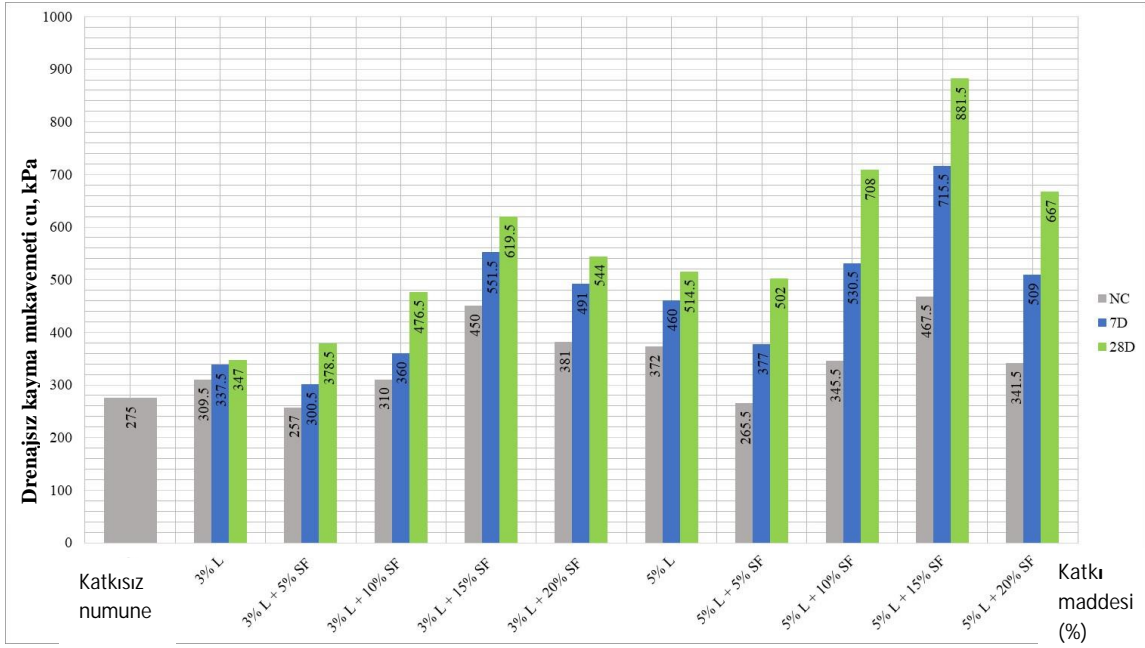
3. OPTİMUM KATKI KOMBİNASYONLARI

Tablo 3'de her bir kür durumu için optimum katkı kombinasyonları görülebilir.

Tablo 3 En iyi katkı kombinasyonları

Kür durumu	Şişme Yüzdesi	Drenajsız Kayma Dayanımı
Kürsüz	5% L + 5% SF	5% L + 15% SF
7 gün kür	5% L + 5% SF	5% L + 15% SF
28 gün kür	5% L + 10% SF	5% L + 15% SF





Şekil 3. Drenajsız kayma mukavemeti c_u , yüzde katkı miktarı ve kürlenme etkisi

Birinci öncelik şişme potansiyelini azaltmak olduğu için, şişen kil numunesini şişme potansiyeli açısından iyileştirmek için %5 Kireç ve %5 Silis dumanı ve 7 günlük kürlenme süresine ihtiyaç vardır, %5 Kireç ve %5 Silis dumanı numunesi ve 7 günlük kürlenme süresi, katkısız numunenin şişme potansiyelini (S_p =%33) 1/14 oranında (S_p =%2.42'lik şişme potansiyeline) düşürmüştür, ve drenajsız kayma mukavemetini 1.4 kat arttırmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Katkısız numune için serbest şişme %33 olarak ölçülmüştür. Ancak kireç ve silis dumanı ilavesi ve kürlenme ile, şişme potansiyeli önemli ölçüde azalmıştır.

%5 L + %5 SF karışımı, şişen bir kilin şişme özelliğini iyileştirmek için en uygun kombinasyondur. Bu çalışmanın temel amacı şişme yüzdesini düşürmek olduğundan, (%5 L + %5 SF), sadece %5 L kullanmaktan çok daha etkili olarak maksimum iyileşmeyi sağlamıştır.

Mukavemet göz önünde bulundurulduğunda, %5 L + %5 SF eklenmiş numunelerin drenajsız kayma mukavemetinin, iyileştirilmemiş numunelerin drenajsız kayma mukavemetinden, 1.4 kat fazla olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, silis dumanı ve kirecin birlikte kullanılması, şişen zemini iyileştirmede olumlu sonuçlar vermiştir. Kirecin Ca^{2+} ile kilin Na^+ arasındaki katyon değişim reaksiyonu ve kirecin Ca^{2+} ile silis dumanının SiO_2 'si arasındaki reaksiyon, puzolanik bir CSH bileşiği oluşturmuş ve kil parçacıklarını birbirine bağlamıştır. Şişen kile, kireç ve silis dumanının eklenmesi, şişme potansiyelini azaltmış ve şişen kilin mukavemetini artırmıştır. Silis dumanının, zemin iyileştirmede kullanılması, silis dumanının depolanması nedeniyle çevreye verilebilecek zararı da azaltmaktadır.



Kaynaklar

- Abd El-Aziz, M. A., Abo-Hashema, M. A., & El-Shourbagy, M. (2004). "The effect of lime-silica fume stabilizer on engineering properties of clayey subgrade". Engineering Conference, Faculty of Engineering, Mansoura University, Paper, 96, 1–18.
- Alrubaye, A. J., Hasan, M., & Fattah, M. Y. (2017). "Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime". International Journal of Geotechnical Engineering, 11(1), 90–96. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1187884>.
- Fattah, M. Y., Al-Saidi, A. A., & Jaber, M. M. (2015). "Characteristics of clays stabilized with lime-silica fume mix". Bollettino Della Societa Geologica Italiana, 134, 104–113.
- Goodarzi, A. R., Akbari, H. R., & Salimi, M. (2016). "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume". Applied Clay Science, 132–133, 675–684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>
- Kalkan, E., & Akbulut, S. (2004). "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners". Engineering Geology, 73(1), 145–156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001>
- Phanikumar, B. R., m, J. R., & e, R. R. (2020). "Silica fume stabilization of an expansive clay subgrade and the effect of silica fume-stabilised soil cushion on its CBR". Geomechanics and Geoengineering, 15(1), 64–77. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1620348>
- Prusinski, J. R., & Bhattacharja, S. (1999). "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils". Transportation Research Record, 1652(1), 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
- Qing, Y., Chuanxin, D., Jinli, Z., & Gang, Y. (2020). "Influence of silica fume and additives on unconfined compressive strength of cement-stabilized marine soft clay". Journal of Materials in Civil Engineering, 32(2), 04019346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003010)

