

KİREÇLE STABİLİZE EDİLMİŞ KİL ZEMİNLERİN DAYANIMINA GECİKMİŞ KOMPAKSİYONUN ETKİSİ

Murat TÜRKÖZ^{1*}, Alper BAŞPINAR²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0241-113X>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8850-4769>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kil zemin, Kireç, Gecikmiş Kompaksiyon, Serbest Basınç Dayanımı.	<i>Kil zeminlerin kireç katkısı kullanılarak stabilizasyonu hem ekonomik hem de çevresel etkilerden dolayı en çok tercih edilen yöntemdir. Stabilizasyon sonrası zeminin mühendislik özelliklerinde ortaya çıkan gelişme, kireç katkılı zeminlerin dolgularda kullanılmasına imkan tanır. Dolguda kullanılmak için farklı kompaksiyon enerjilerinde arazide sıkıştırılarak yerleştirilmeleri sırasında oluşması muhtemel sıkışma gecikmesi, katkılı zeminlerin performansı üzerinde önemli bir etkiye neden olur. Bu çalışmada bir yol projesinden alınan zemin örneklerinin çeşitli oranlarda sönmüş kireç katkısı ile karıştırıldıktan sonra gecikmiş kompaksiyonun zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, yüksek (CH) ve düşük (CL) plastisiteli iki ayrı kil zemin numunesine kuru ağırlıklarının % 0, 3, 6, 9, 12 ve 15'i oranında kireç eklenerek hazırlanan örnekler üzerinde, karışımdan hemen sonra ve yedi gün sonra Standart Proctor düzeyinde kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Gecikmiş kompaksiyonun ve kireç katkı yüzdesinin hem kompaksiyon karakteristiklerine hem de serbest basınç dayanımına (SBD) olan etkisini araştırmaya yönelik olarak toplam 22 adet kompaksiyon deneyi ve takibinde de kürsüz, 7 gün ve 28 gün küre bırakılan örnekler üzerinde de toplamda 64 adet serbest basınç deneyi yapılmıştır. Gecikmiş kompaksiyonun SBD değerleri üzerindeki etkisi 28 gün boyunca kürde bırakılan örneklerde çok daha etkili olmuştur. Kireç katkısı ile yapılacak zemin stabilizasyonunda, özellikle uzun süreli gecikmiş kompaksiyon, zemin türüne bağlı olarak dayanım üzerinde önemli etkilere neden olduğu belirlenmiştir.</i>

THE EFFECT OF DELAYED COMPACTION ON THE STRENGTH OF LIME STABILIZED CLAY SOILS

Keywords	Abstract
Clay soil, Lime, Delayed compaction, Unconfined Compressive Strength.	<i>Stabilization of clay soils using lime additive is the most preferred method due to both economic and environmental effects. The improvement in the engineering properties of the soil after stabilization allows the use of lime-added soils in fillings. Compaction delay that may occur during the placement by compacting in the field with different compaction energies for use in the filling causes a significant effect on the performance of additive soils. In this study, the effects of delayed compaction in soil strength properties have been investigated after mixing soil samples provided from a road project with hydrated lime. On the samples which contain high (CH) and low (CL) plasticity clay soils mixed with (0, 3, 6, 9, 12, 15% by dry weight) lime, compaction tests have been conducted with the Standard Proctor level right after mixing and after 7-day-cured. In order to investigate the effect of delayed compaction and lime additive percentage on both compaction characteristics and strength, a total of 22 compaction tests and a total of 64 unconfined compressive strength (UCS) tests were carried out on samples that were left uncured, 7 days and 28 days cure. The effect of delayed compaction on UCS values was much more effective in samples left on cure for 28 days. It has been determined that in soil stabilization with lime additive, especially long-term delayed compaction causes significant effects on the strength depending on the soil type.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi

: 02.09.2020

Submission Date

: 02.09.2020

Kabul Tarihi

: 31.11.2020

Accepted Date

: 31.11.2020

* Sorumlu yazar; e-posta : mturkoz@ogu.edu.tr

1. Giriş

İnşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan, düşük dayanıma sahip kil zeminlerin stabilizasyonu popüler bir çalışma konusu olarak önemini sürdürmektedir. Bu tür zeminlerin inşaat alanından kazılarak uzaklaştırılması ve yerine taneli malzemenin serilmesi hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan olumsuz durumlar sunar. Taneli malzeme temini ve sahaya taşınması sırasında çevreye salınan egzoz gazları önemli bir çevresel soruna neden olur. Bu gibi nedenlerden dolayı bu tür zeminlerin farklı içerikli katkıları kullanılarak stabilize edilmesi daha pratik bir yaklaşımdır. Stabilizasyon amaçlı farklı katkıları kullanılmasına rağmen, kireç doğal bir malzeme olması ve temininde sağlanan kolaylıklar nedeniyle yaygın olarak kullanılan katkı malzemesidir (Ali ve Mohamed, 2017). Karayolu, demiryolu, havaalanı pistleri ve kanal temellerinin iyileştirilmesinde kireç ile stabilizasyon yaygın kullanılan bir tekniktir (Basma ve Tuncer, 1991; Bell, 1996; Anaokar ve Mhaiskar, 2020). Kireç ile stabilize edilecek zemindeki kil türüne bağlı olarak kullanılacak kirecin zeminin kuru ağırlığının %1-%3 arasında kullanılmasıyla plastisite karakteristiklerinde önemli değişimlere neden olduğu %2-%8 aralığında ise dayanım özelliklerinde artışlar sağladığı ifade edilmiştir (Basma ve Tuncer, 1991) Örneğin, Ghobadi, Abdilor ve Babazadeh (2014), %1-3-5-7 oranlarında zemine karıştırılan sönmüş kireç katkı yüzdelerinde, 30 gün küre maruz bırakılan karışımlarda en yüksek serbest basınç dayanımının %7 katkı seviyesinde sağlandığını belirlemişlerdir. Benzer şekilde Gidday ve Mittal (2020) tarafından yapılan çalışmada da serbest basınç dayanımı deneyi sonuçlarına bağlı olarak yüksek plastisiteli kil zeminin dayanımı üzerinde %7-%9 kireç katkı muhtevasının önemli olduğu ifade edilmiştir.

Konu esasında yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, kireç ile yapılan stabilizasyon sonrasında dayanım değerleri üzerinde zeminin sahip olduğu kil tipinin, sıcaklığın ve kompaksiyon türünün önemli olduğu görülmüştür (Parsons, Johnson ve Cross, 2001; Al-Rawas, Hago ve Al-Sarmi, 2005). Kireç, zemin ve su karışımı sonrası yapılan kompaksiyon deneyleriyle belirlenen kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yapılmaktadır. Karışım ve kompaksiyon arasındaki gecikme aralığının katkılı zeminler üzerinde ne derecede etkili olduğunu değerlendiren çalışmalar oldukça az olup daha çok yüksek plastisiteli killeri içermektedir. Gecikmiş kompaksiyon; genellikle zemine kireç ve su eklenmesi sonrası elde edilen karışım ile kompaksiyon arasında geçen süre olarak tanımlanır (Sweeney, Wong ve Fredlund, 1988). Karışım sonrası sahada beklenilmeyen yağmur veya bozulan ekipman nedeniyle kompaksiyon işleminde gecikmeler mümkün olabilmektedir. Osinubi (1998) kireç karışımından 3 saat sonra yapılan

kompaksiyon deney sonucuna bağlı olarak hazırlanan örneklerin dayanımın değerlerinde azalmaya dikkat çekmiştir. Di Sante, Fratolocchi, Mazzieri ve Brianzoni (2015) yüksek plastisiteli şişen zeminin kireçle stabilizasyonunda, kompaksiyon gecikmesinin kompaksiyon karakteristiklerine olan etkisini incelemişlerdir. Zemin numunelerine ağırlıkça %0-2-4-8-12 kireç ilave edilmiş ve 0-48 saat aralığındaki etkileri değerlendirilmiştir. Gecikmiş kompaksiyon sonucunda maksimum kuru yoğunlukta azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada farklı kireç katkı muhtevalarında stabilize edilen hem yüksek hem de düşük plastisiteli kil zeminlerin dayanım özellikleri üzerinde uzun süreli gecikmiş kompaksiyonun etkileri araştırılmış ve sonuçlar kil zemin türüne bağlı olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

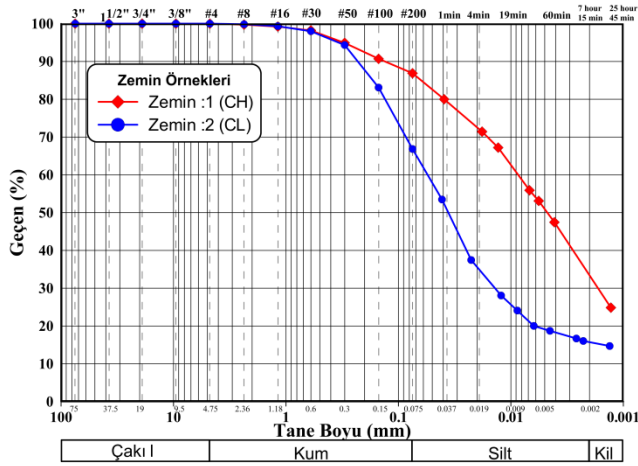
Farklı yol inşaatı temellerinden alınan zemin örneklerinin tanımlanmasına yönelik; Atterberg limitleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Şekil 1'de zemin numunelerinin tane dağılım eğrileri sunulmuştur. Standart Proctor enerji seviyesinde yapılan kompaksiyon deneyleri de her iki zemin numunesinin kompaksiyon eğrileri belirlenmiştir (Şekil 2).

Tablo 1

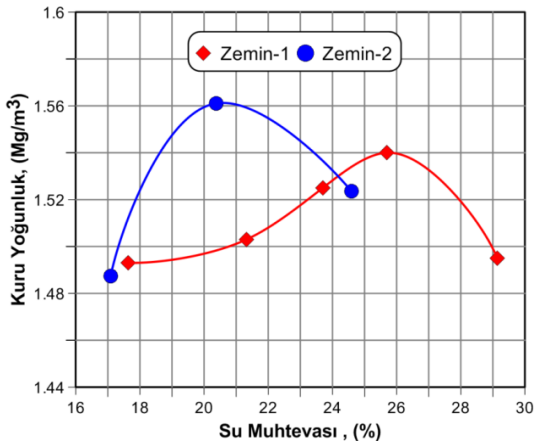
Zeminlerin Geoteknik Özellikleri

Özellik	Zemin-1-	Zemin-2-
Çakıl (%)	-	-
Kum (%)	6	32
Silt (%)	60	52
Kil (%)	34	16
Likit limit (%)	64	32
Plastik limit (%)	29	19
Plastisite indisi (%)	35	13
Özgül gravite, G _s	2.73	2.69
Zemin sınıfı (USCS)	CH	CL
Aktivite, A	1.03	0.81
Maksimum kuru yoğunluk (Mg/m ³)	1.535	1.563
Optimum su muhtevası (%)	25.4	20.9

Tablo1’de zeminlere ait geoteknik özellikler sunulmaktadır. Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemi (USCS) esasında yapılan değerlendirmede zemin-1 yüksek plastisiteli kil (CH) ve zemin-2 düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Aktivite değerlerine bakıldığında; aktivitesi 1.03 olan zemin-1’in aktivitesi 0.81 olan zemin-2’ye oranla çok daha aktif kil minerali içerdiği öngörülmektedir.



Şekil 1. Zemin Numunelerinin Tane Dağılım Eğrileri

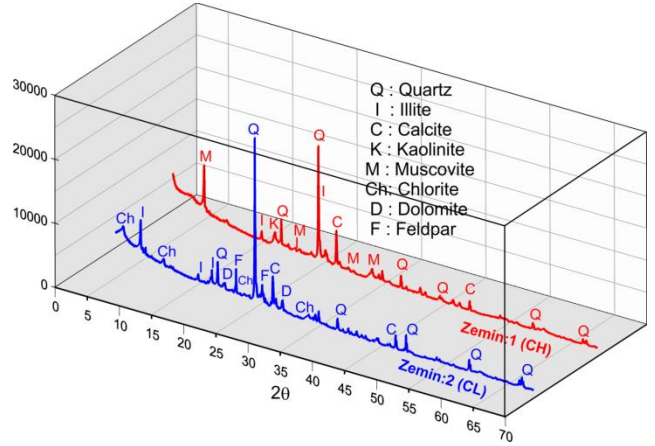


Şekil 2. Zemin Numunelerinin Kompaksiyon Eğrileri

Numunelerin sahip olduğu kil mineral tipine yaklaşımda bulunmak için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde X-ışını kırınımı (XRD) deneyleri yapılmıştır. Şekil 3’de numunelerin XRD modelleri sunulmaktadır. Şekil 3’de kil türü olarak kaolinit ve illitin yanı sıra azda olsa kil olmayan kuvars, kalsit ve feldspat minerallerin varlığını görülmüştür. İlaveten, zemin-1 muhtevasında zemin-2’ye oranla az miktarda da olsa smektit (montmorillonit) kil minerali daha fazladır.

Tablo 2’de numunelerin ve katkı malzemesi olarak kullanılan sönmüş kirecin kimyasal özellikleri verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları

değerlendirildiğinde, her iki zemin numunesinin de esas olarak silika ve alüminyum oksitten oluştuğu görülmektedir. Moore ve Jones (1971), özellikle kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin uzun dönem dayanımları üzerinde mevcut silisin mevcut alüminyumdan daha önemli olduğunu ifade etmiştir.



Şekil 3. Numunelerin XRD Modelleri

Tablo 2

Zeminlerin ve Kirecin Kimyasal Özellikleri

Bileşim	Zemin-1 (CH) (%)	Zemin-2 (CL) (%)	Sönmüş kireç (%)
SiO ₂	52.14	55.15	6.00
Al ₂ O ₃	16.58	12.67	1.70
Fe ₂ O ₃	6.47	4.58	0.70
CaO	5.13	7.62	86.90
MgO	1.68	3.68	0.70
Na ₂ O	0.22	1.34	0.06
K ₂ O	1.17	2.89	0.18
Kızdırma kaybı	11.75	10.83	6 (maks.)

Katkı malzemesi olarak çalışmada kullanılan ticari olarak satılan standart toz halinde elde edilen sönmüş kireç, incelenen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Tablo 2’den kullanılan kirecin az miktarda alümina, demir ve alkali oksitlere ilaveten çimento ana bileşenlerinden olan CaO içeriğinin önemli seviyede yüksek olduğu görülebilmektedir.

2.2. Yöntem

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Numune alma ve örnek hazırlama aşamalarında ASTM (2007) standart yöntemleri izlenmiştir. Araziden alınarak laboratuvara getirilen zemin numuneleri, sahip oldukları doğal su muhtevalarından dolayı topak halde olduklarından 24 saat boyunca 105 ° C'de bir etüvde kurutuldu. Numunelerin içerdiği yüksek ince dane muhtevasından dolayı hava kurutması uzun zaman alacağından ve devam eden deneylerde aynı başlangıç durumunun temsil edilmesindeki kolaylıktan dolayı etüv kurutması tercih edildi. Etüv kurutmasından çıkan numunelerin üniform dağılımını elde etmek için numuneler plastik tokmakla ufalanarak 4 no'lu elekten geçirildi. Elenen numuneler büyük bir kap içinde harmanlanarak çuvallara aktarıldı. Laboratuvar ortamının sahip olduğu nemden dolayı, sabit su muhtevasına sahip olmaları için yaklaşık 2 hafta çuvallar içinde bekletildi. Sabit başlangıç su muhtevasına sahip numuneler, kuru ağırlıklarının % 3, 6, 9, 12 ve 15'i oranında 5 farklı kireç muhtevasında ayrı ayrı homojen olarak karıştırıldı.

Örneklerin hazırlanmasında gerekli olacak kompaksiyon karakteristiklerini (optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk) belirlemek için Standart Proctor enerji seviyesinde kompaksiyon deneyleri 2 aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada, karışımdan hemen sonra gecikme olmadan, artan su muhtevalarında kompaksiyon deneyleri yapıldı. İkinci aşamada zemin ve kireç karışımlarına belirli oranda su eklenerek elde edilen harmanlanmış karışımlar çift katlı plastik poşetlerde 7 (yedi) gün boyunca kontrollü bir ortamda tutuldu. Kompaksiyon gecikmesinin kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yedi gün bekletilen karışımlar üzerinde tekrardan artan su muhtevalarında kompaksiyon deneyleri yapıldı. Sonuç olarak, her bir kireç katkı yüzdesinde, hem karışımdan hemen sonra hem de karışımdan yedi gün sonra yapılan kompaksiyon deneylerinde, serbest basınç deneyinde kullanılacak örnekleri hazırlamak için gereken optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir.

DeneySEL çalışmalar, gecikmiş kompaksiyonun ve kireç katkı yüzdesinin hem kompaksiyon karakteristiklerine hem de serbest dayanımına olan etkisini araştırmaya yönelik olarak Tablo 3'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her bir kireç katkı seviyesinde toplamda 22 adet kompaksiyon deneyi ve takibinde de kürsüz, 7 gün ve 28 gün küre bırakılan örnekler üzerinde de toplamda 64 adet serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Kompaksiyon deneyleri, Standart Proctor yöntemi esasında 600 kN-m/m³ enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'de sunulduğu şekliyle iki

aşamada yapılmıştır. Bu çalışmada, sıkıştırılarak hazırlanan katkılı örnekler üzerinde serbest basınç dayanımı (q_{un}) deneyleri, ASTM D2166 (2016) standardına göre yapıldı. Sıkıştırılmış örnekler üzerinde iki seri deney gerçekleştirildi. İlk seri deneyler karışımdan hemen sonra bulunan kompaksiyon karakteristiklerinde, ikinci seri deneylerde gecikmiş kompaksiyon karakteristiklerinde bulunan kompaksiyon karakteristiklerinde 100 mm yükseklik ve 50 mm çapa sahip paslanmaz çelik tüpler içinde sıkıştırılmış örnekler üzerinde yapıldı. Stabilizasyonun dayanım üzerindeki etkisi zamanın, sıcaklığın ve nemin bir fonksiyonudur (Mitchell ve Hooper, 1961). Bu nedenle, kür süresinin örneklerin dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla elde edilen örnekler streç filmlere sarılarak 7 gün ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında desikatör içinde bekletildi. Serbest basınç deneyleri dakikada 1 mm deformasyon uygulayan otomatik bir yükleme makinesi ile yapıldı (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışmada Kullanılan Serbest Basınç Dayanımı (SBD) Deney Ekipmanı

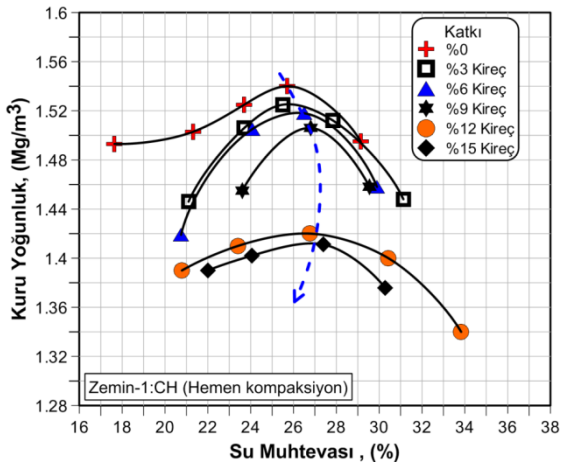
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kompaksiyon Karakteristikleri Üzerindeki Etki
Standart Proctor deneyi yöntemi esasında, farklı kireç katkı yüzdesinde yapılan hemen ve gecikmiş kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrileri zemin-1 ve zemin-2 için sırasıyla Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, her iki zeminde de artan kireç yüzdesine bağlı olarak en büyük kuru yoğunlukta azalma ve optimum su muhtevasında artışlar görülmüştür. Benzer davranış Chen, Wang, Li, Huang, Li ve Wu (2018) ve GhavamShirazi ve Bilsel (2020) tarafından yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir.

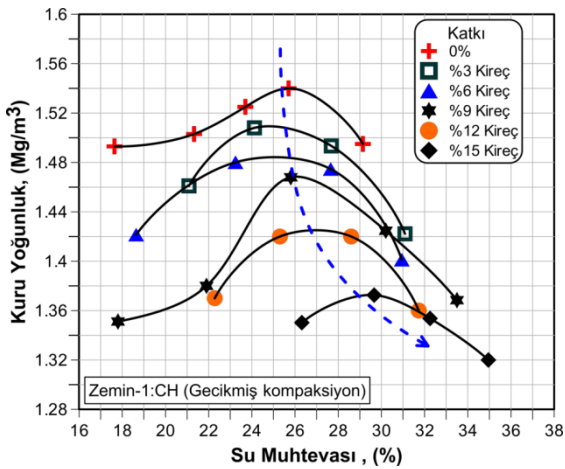
Tablo 3
DeneySEL ÇALIŞMA PROGRAMI

Kireç (%)	Kompaksiyon Deneyleri				Serbest Basınç Deneyleri											
	Zemin-1		Zemin-2		Zemin-1			Zemin-2			Zemin-1			Zemin-2		
	KGS (Hemen)		KGS (7-gün)		KGS (Hemen)			KGS (7-gün)			KGS (Hemen)			KGS (7-gün)		
	Kür süresi (gün)		Kür süresi (gün)		Kür süresi (gün)			Kür süresi (gün)			Kür süresi (gün)			Kür süresi (gün)		
	0	7	28	0	7	28	0	7	28	0	7	28	0	7	28	
0	x	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

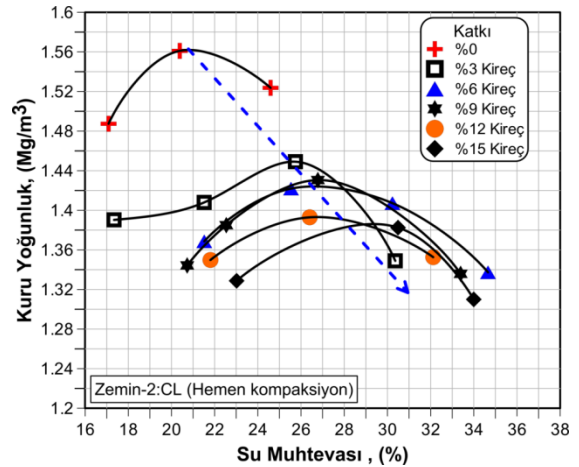
*KGS = Kompaksiyon gecikme süresi



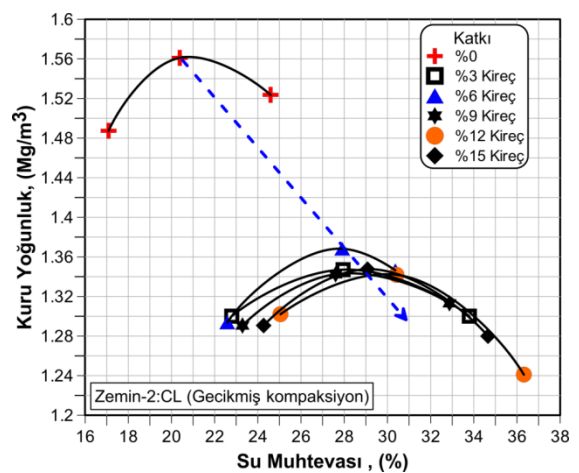
Şekil 5. Zemin-1 İçin Hemen Kompaksiyon Sonrası Kompaksiyon Eğrileri



Şekil 6. Zemin-1 İçin Gecikmiş Kompaksiyon Sonrası Kompaksiyon Eğrileri



Şekil 7. Zemin-2 İçin Hemen Kompaksiyon Sonrası Kompaksiyon Eğrileri



Şekil 8. Zemin-2 İçin Gecikmiş Kompaksiyon Sonrası Kompaksiyon Eğrileri

Tablo 4

Kompaksiyon Karakteristikleri

Kireç (%)	Zemin-1 (CH)				Zemin-2 (CL)			
	KGS* (Hemen)		KGS (7-gün)		KGS (Hemen)		KGS (7-gün)	
	MKY** (Mg/m ³)	OSM*** (%)	MKY (Mg/m ³)	OSM (%)	MKY (Mg/m ³)	OSM (%)	MKY (Mg/m ³)	OSM (%)
0	1.541	25.3	-	-	1.563	20.90	-	-
3	1.525	25.9	1.510	25.2	1.451	25.30	1.347	28.00
6	1.520	26.0	1.486	25.2	1.424	26.70	1.370	28.50
9	1.506	26.8	1.469	26.2	1.432	26.20	1.343	28.00
12	1.420	26.8	1.427	27.0	1.393	26.40	1.343	29.80
15	1.412	26.8	1.373	29.8	1.385	29.80	1.348	29.08

*KGS = Kompaksiyon gecikme süresi

**MKY= Maksimum kuru yoğunluk

***OSM = Optimum su muhtevası

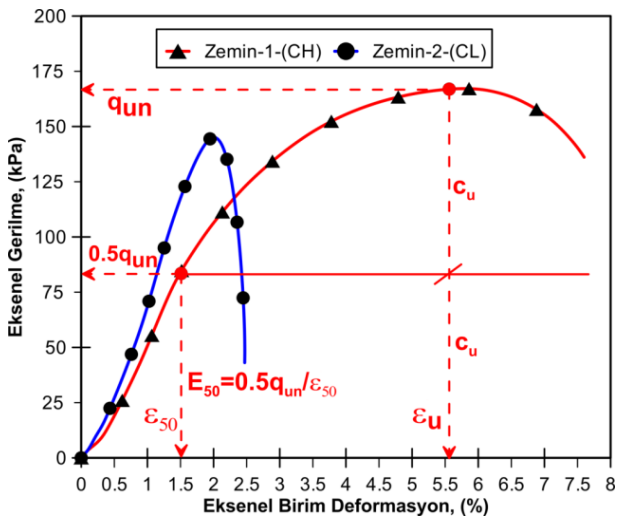
Hemen ve gecikmiş kompaksiyon eğrilerinden kompaksiyon karakteristikleri belirlenmiş ve sayısal değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Zemin-1 numunesinin katkısız durumda maksimum kuru yoğunluk (MKY) değeri 1.541 Mg/m³'dür. Hemen kompaksiyon sonrası %9 kireç katkı seviyesine kadar olan katkı yüzdelerinde MKY değerinde düşük miktarda bir azalma gözlenirken, %12 kireç yüzdesinde MKY da (1.420 Mg/m³) önemli seviyede azalma gözlenmiş ve %15 seviyesinde (1.412 Mg/m³) çok değişmemiştir. Gecikmiş kompaksiyon sonrasında ise MKY değeri artan kireç katkı yüzdesiyle birlikte sürekli bir azalma göstermiştir. %12 kireç katkısında MKY 1.427 Mg/m³, %15 katkı seviyesinde de 1.373 Mg/m³'e düşmüştür. Diğer bir ifadeyle gecikmiş kompaksiyon sonrası % 3, 6, 9, 12 ve 15 kireç yüzdelerinde MKY değerlerinde sırasıyla %2.01, %3.57, %4.67, %7.40 ve %10.90 oranında azalma olmuştur. Kompaksiyon gecikmesi hemen yapılan kompaksiyona oranla MKY değerlerinde ilave bir azalmaya sebep olmuştur. Ali ve Mohamed (2017) tarafından belirtildiği gibi, bu azalmanın nedeni, kireçle stabilize kilin kompaksiyon gecikmesi sırasında katyon değişiminin ve hızlı büyüyen çimentolu bileşiklerinin çok ince tanelerin bir arada tutulmasını sağlayan flokülasyona bağlanabilir. Kompaksiyon karakteristiklerindeki bu değişimler gecikmiş kompaksiyon sırasında bekleyen karışım aşamasında kireç ve zemin arasında devam eden reaksiyon nedeniyledir. Daha fazla su kaybına neden olan ve kompaksiyona karşı direnci artıran zayıf çimentolaşma dolayısıyla gelişen daha büyük tane kümeleşmesi MKY değerlerinde önemli azalmaya neden olmuştur.

Düşük plastisiteli özellik gösteren zemin-2 açısından değerlendirildiğinde ise hemen kompaksiyon ve gecikmiş kompaksiyon deneyleri sonrasında özellikle düşük kireç yüzdelerinde MKY değerlerinde önemli derecede bir azalma olmuştur. % 3 kireç katkı seviyesinde kuru yoğunlukta ani bir azalma olmuştur ve artan katkı seviyesinde kuru yoğunlukta önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Kompaksiyon karakteristiklerindeki değişim sınırlı kalmıştır. Katkısız durumda zemin-2'nin belirlenen MKY değeri 1.563 Mg/m³'dür. Hemen kompaksiyon sonrası deneylerden % 3, 6, 9, 12 ve 15 kireç yüzdelerinde MKY değerlerinde sırasıyla %7.17, %8.89, %8.39, %10.88 ve %11.40 oranında azalma, gecikmiş kompaksiyon sonrasında da %13.82, %12.35, %14.08, %14.08 ve %13.76 oranında daha belirgin azalma olduğu belirlenmiştir. Kuru yoğunluktaki bu azalma, kompaksiyon gecikmesi sırasında gevşek durumda bekleyen karışımda gelişen çimentolanmaya atfedilir. Başka bir deyişle, kompaksiyon deneyindeki gecikme kil partikülleri arasında daha sıkı bağlanmaya neden olacak şekilde kil tanelerinin aglomerasyonuna neden olmuştur. Zeminde bulunan su molekülleri veya diğer iyonların yerini alan kalsiyum iyonları dağınık çift su tabakasında azalmaya neden olur. Bu durum, tanelerin birbirine yaklaşmasına ve floküle yapı kazanarak uygulanan kompaksiyon enerjisine daha fazla direnç göstermesine sebep olur. İlaveten, zeminin floküle yapısı nedeniyle sahip olduğu boşluklarda su molekülleri hapsolür. Böylece kireç katkılı zeminlerin optimum su muhtevaları artar ve maksimum kuru yoğunlukları azalır. Fazla miktarda eklenen kireç zeminin boşluklarına girer. Bu nedenlerden dolayı, %3'den fazla kireç ilavesi MKY da önemli bir değişim olmazken OSM'sı hızla artmıştır.

3.2. Dayanım Üzerindeki Etki

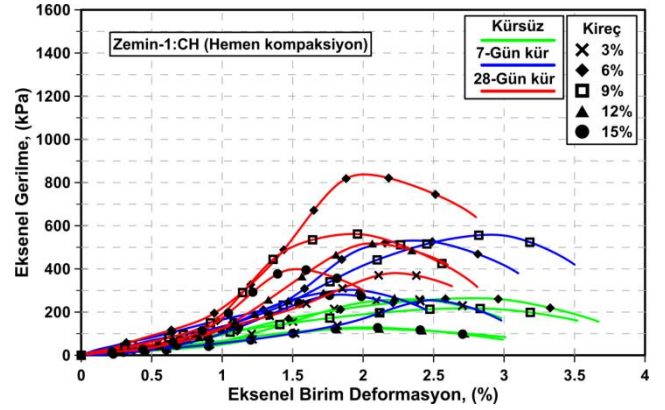
Deneyler, kompaksiyon gecikme süresinin kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin serbest basınç dayanımı (SBD) üzerindeki etkisini araştırmak ve kür süresi boyunca dayanım değişikliğini değerlendirmek için yapılmıştır. Şekil 9'da katkısız zemin numunelerinin SBD deney sonucu gerilme-deformasyon eğrileri gösterilmiştir. Zemin-1 % 5.56 birim deformasyon seviyesinde 166.9 kPa serbest basınç dayanımı (q_{un}) değerine, zemin-2 ise %1.95 birim deformasyon seviyesinde 144.5 kPa serbest basınç dayanımı değerine ulaşmıştır. Yüksek plastisiteli özellik gösteren zemin-1, düşük plastisiteye sahip zemin-2'ye oranla daha büyük birim deformasyon değerinde geçerek, sünek bir davranış sergilemiştir.



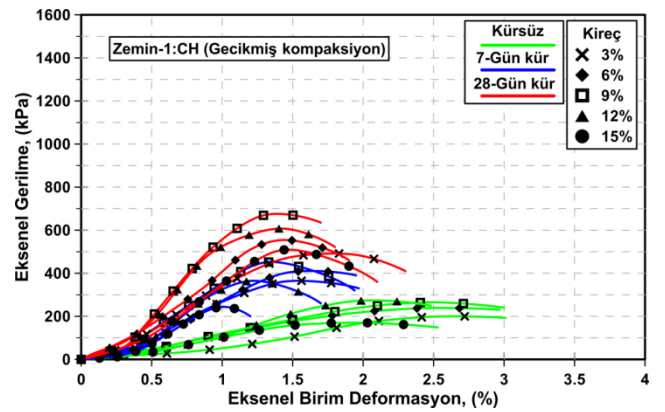
Şekil 9. Katkısız Zemin Numunelerinin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Eğrileri

Zemin-1 ve zemin-2 için hemen ve gecikmiş kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanmış örneklerin farklı kür süreleri ve kireç yüzdelere bağlı, SBD deneyi sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 10, 11, 12 ve 13'de sunulmuştur.

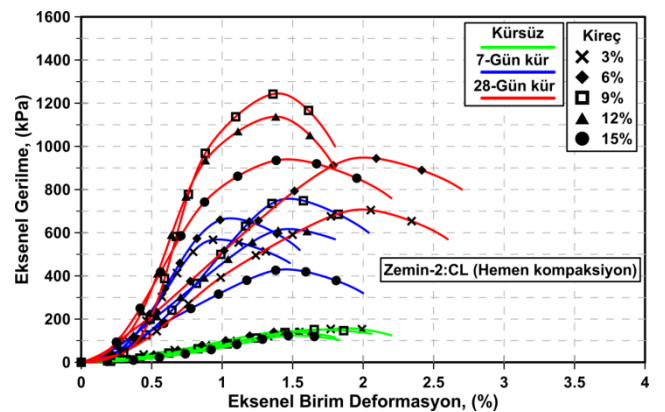
Tepe (veya göçme: q_{un}) noktasına kadar, serbest basınç dayanımı deneyi sonucunda ulaşılan gerilme-deformasyon eğrisi altındaki alan nihai dayanım değerindeki deformasyon enerjisi veya enerji sönmüleme kapasitesi olarak tanımlanır ve dayanıklılığın değerlendirilmesinde kullanılır (Mirzababaei, Miraftab, Mohamed ve McMahon, 2013).



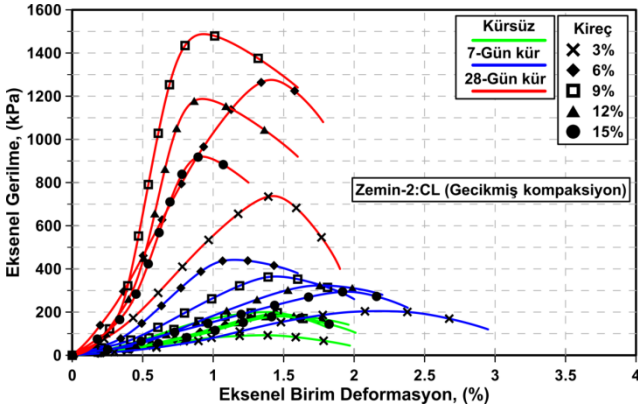
Şekil 10. Zemin-1 İçin Hemen Kompaksiyon Karakteristiklerinde Hazırlanmış Örneklerin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Eğrileri



Şekil 11. Zemin-1 İçin Gecikmiş Kompaksiyon Karakteristiklerinde Hazırlanmış Örneklerin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Eğrileri



Şekil 12. Zemin-2 İçin Hemen Kompaksiyon Karakteristiklerinde Hazırlanmış Örneklerin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Eğrileri

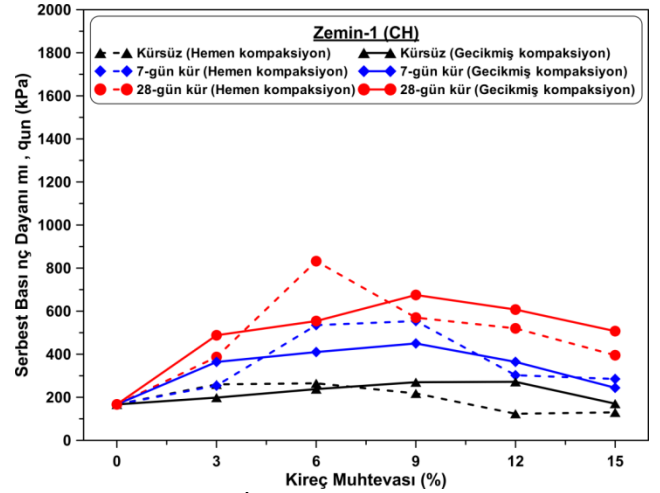


Şekil 13. Zemin-2 İçin Gecikmiş Kompaksiyon Karakteristiklerinde Hazırlanmış Örneklerin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Eğrileri

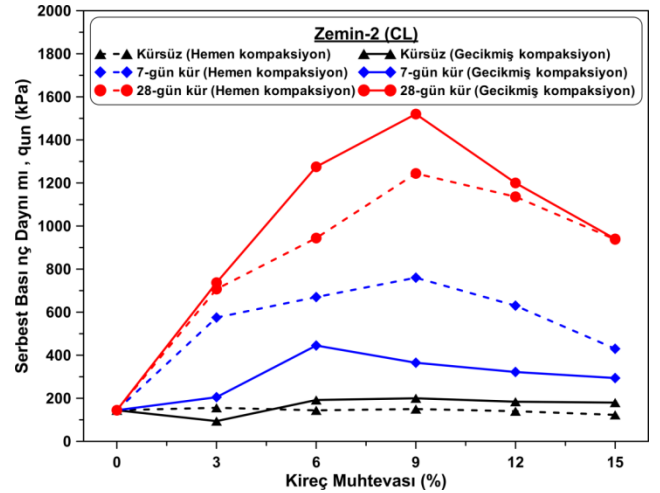
Şekil 10 ve 11'den de görüldüğü gibi, zemin-1 üzerinde yapılan deneylerden gecikmiş kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanan örneklerin sergilediği eğrilerin enerji sönümlenme kapasiteleri hemen kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanan örneklerin enerji sönümlenme kapasitelerinden daha düşüktür. Örneğin; hemen kompaksiyon serisinde %6 kireç muhtevasında 28 gün kür sonrasında ulaşılan eğrinin sergilediği enerji sönümlenme kapasitesinin aynı durumda gecikmiş kompaksiyon serisinde ulaşılan eğrinin sergilediği enerji sönümlenme kapasitesinden daha büyük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle gecikmiş kompaksiyon serilerinde (Şekil 11) zemin örnekleri daha gevrek bir davranış göstererek daha düşük bir dayanıma geçmiştir.

Şekil 12 ve 13'de zemin-2 için elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri görülmektedir. Gecikmiş kompaksiyon serisinde yapılan deneylerden elde edilen gerilme-deformasyon eğrilerinin hemen kompaksiyon serilerine oranla daha büyük enerji sönümlenme kapasiteleri ve dolayısıyla daha büyük dayanım sağlayacağı görülebilmektedir. Özellikle 28 gün kür süresi sonrası gecikmiş kompaksiyon serilerinde daha büyük eğri altı alan sergilemiştir. %9 kireç muhtevasında 28 gün kür koşullarında yapılan deney verilerinden gecikmiş kompaksiyon sonrası ulaşılan gerilme-deformasyon eğri aynı koşullarda hemen kompaksiyon sonrası elde edilen eğriden daha büyük bir alana sahiptir. Diğer bir ifadeyle gecikmiş kompaksiyon serilerinde özellikle 28 gün kür sonrası hemen serilerine oranla daha büyük dayanımlar belirlenmiştir.

Şekil 14 ve 15'de de sırasıyla zemin-1 ve zemin-2 için farklı kompaksiyon gecikme sürelerine ait kür süreleri ve kireç yüzdelere bağlı SBD deneyi sonucundaki ilişkiler sunulmuştur.



Şekil 14. Zemin-1 İçin Farklı Kompaksiyon Gecikme Sürelerine Ait Kür Süreleri Ve Kireç Yüzdelere Bağlı SBD Deneyi Sonucundaki İlişkiler



Şekil 15. Zemin-2 İçin Farklı Kompaksiyon Gecikme Sürelerine Ait Kür Süreleri Ve Kireç Yüzdelere Bağlı SBD Deneyi Sonucundaki İlişkiler

Katkısız durumda zemin-1 SBD değeri 166.9 kPa olup, hemen serilerinde yapılan deneylerde 7-gün kür süresi sonucunda %9 kireç muhtevasında 554 kPa'ya ve 28-gün kür süresi sonucunda da %6 kireç muhtevasında 832 kPa'ya yükselmiştir. %9'dan fazla kireç muhtevaslarında ise hem 7-gün hem de 28-gün kür sonrası deneylerde dayanım değerlerinde azalma olmuştur. Gecikmiş kompaksiyon serisi SBD deneylerinden %9 kireç muhtevasında 7-gün ve 28-gün kür sonrası sırasıyla 450 kPa ve 675 kPa dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Her iki seride de artan kür süresi ile dayanımda artışlar görülmüş olmasına rağmen gecikmiş kompaksiyon serilerinde elde edilen dayanım değerleri hemen kompaksiyon serisinde elde edilenlerden düşük gerçekleşmiştir. Yüksek plastisiteli özellik gösteren zemin-1 numunesi üzerinde dayanım

açısından kompaksiyon gecikmesinin olumsuz etkisi olmuştur.

Zemin-2 numunesi üzerinde yapılan SBD sonuçları Şekil 15'de sunulmuştur. Şekil 15'den görülebileceği gibi hemen kompaksiyon serisinde kürsüz dayanım değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Kür süresinin atmasıyla birlikte dayanımda önemli artışlar olmuştur. SBD deney sonuçlarından, kireç içeriğini % 3'ten %9'a yükseldiğinde, 7 ve 28 gün kür için sırasıyla 575 kPa'dan 760 kPa'ya ve 707 kPa'dan 1249 kPa'ya yükselmiştir. Benzer sonuçlar Jahandari, Saberian, Zivari, Ghasemi ve Vali (2019) tarafından yapılan çalışmada da gözlenmiştir. % 9'dan fazla kireç katkısı, dayanım değerlerinde azalmaya yol açmıştır. Zeminin kil içeriğinin düşük olduğu düşünüldüğünde, % 9'dan fazla kireç zemindeki kil ile yeterince reaksiyona girememiştir.

Zemin-2 örnekleri üzerinde gecikmiş kompaksiyon serisi SBD deney sonuçları değerlendirildiğinde, artan kireç yüzdesiyle birlikte 28-gün kür uygulanmış örneklerde bulunan dayanım değerleri kürsüz ve 7-gün kür koşullarında bulunan dayanım değerlerinden çok daha yüksektir. Kürsüz ve 7-gün kür koşullarındaki örneklerin SBD değerleri yaklaşık %6 kireç muhtevasında en büyük değerlerine ulaşırken, 28-gün kür koşulundaki örneklerde %9 kireç muhtevasında en büyük SBD değerlerine ulaşmıştır. Çizelge 5.3'te gecikmiş kompaksiyon serisi kapsamında sunulan verilerden, %9 kireç muhtevasında örneklerin SBD değerleri 7 ve 28-gün kür sonrası sırasıyla 365 kPa'dan 1520 kPa'ya yükselmiştir. Başka bir deyişle, gecikmiş kompaksiyonun SBD değerleri üzerindeki etkisi 28 gün boyunca kür bırakılan örneklerde çok daha belirgin olmuştur.

Kireç katkılı zeminlerin dayanımları üzerinde zemin içindeki ince tane miktarı ve baskın kil mineral türü önemli bir etkiye sahiptir. Ford, Moore ve Hasek (1982) tarafından yapılan çalışmada, baskın kil mineralinin montmorillonit olduğu zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda serbest basınç dayanımlarında önemli artışlar olmadığı, kullanılan kirecin çoğunun, dayanımı artıracak çimentolu bileşikler oluşturmak yerine çok büyük yüzey alanına sahip montmorillonitin değişimi için kullanıldığı sonucuna varılmıştır. İlaveten kireç ile yapılan iyileştirmenin performansı üzerinde zemin sahip olduğu kimyasal bileşimde önemli bir etkiye neden olur. Özellikle mevcut silisin uzun dönemli dayanım kazancı için mevcut alüminadan daha önemli olduğu Moore ve Jones (1971) tarafından yapılan çalışmada ifade edilmiştir. Dolayısıyla, yüksek plastisiteli ve zemin-2 ye oranla bünyesinde fazla miktarda montmorillonit türü kil minerali ve düşük silis bulunan zemin-1 numunesinin kireç ile stabilizasyonu sonucunda dayanımdaki artışlar zemin-2 ye oranla daha düşük olmuştur.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Kireç muhtevasına bağlı olarak hemen ve gecikmiş kompaksiyonun; kompaksiyon karakteristikleri, serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki farklı plastisite özelliğine sahip zeminler için incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özet olarak sunulmuştur.

Yüksek plastisiteli (zemin-1:CH) ve düşük plastisiteli (zemin-2:CL) kil zeminlerinin her ikisinde de karışımdan hemen sonra yapılan kompaksiyon deneylerinde artan kireç yüzdesine bağlı olarak maksimum kuru yoğunlukta azalma ve optimum su muhtevasında artışlar olmuştur. Kompaksiyon karakteristiklerindeki bu değişimler gecikmiş kompaksiyon sırasında bekleyen karışımda kireç ve zemin arasında devam eden kimyasal reaksiyon nedeniyledir. Kompaksiyon sırasında sıkışmaya karşı direnci artıran zayıf çimentolaşma dolayısıyla gelişen daha büyük tane kümeleşmesi maksimum kuru yoğunluk (MKY) değerinde azalmaya sebep olmuştur. Yüksek plastisiteli kil (zemin-1) zeminde kompaksiyon gecikmesi hemen yapılan kompaksiyona oranla maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ilave bir azalmaya neden olmuştur.

Düşük plastisiteli özellik gösteren zemin-2 numunesinde, hemen kompaksiyon ve gecikmiş kompaksiyon deneyleri sonrasında özellikle düşük kireç yüzdesinde MKY değerlerinde önemli derecede bir azalma olmuştur. % 3 kireç katkı seviyesinde kuru yoğunlukta ani bir azalmayla birlikte artan kireç katkı yüzdesinde kuru yoğunlukta önemli bir değişiklik olmamıştır. Tanelerin birbirine yaklaşmasına ve floküle yapı kazanarak uygulanan kompaksiyon enerjisine daha fazla direnç göstermesine katkı sağlayan kompaksiyon gecikmesi sonrasında, %3'den fazla kireç ilavesi MKY da önemli bir değişime neden olmazken optimum su muhtevası (OSM) hızla artmıştır.

Yüksek plastisiteli zemin numunesi üzerinde yapılan SBD deney sonuçlarından hemen kompaksiyon serilerinde kür süresiyle gelişen dayanım artışı gecikmiş kompaksiyon serilerine oranla daha büyük bulunmuştur. Her iki seride de artan kür süresi ile dayanımda artışlar görülmüş olmasına rağmen gecikmiş kompaksiyon serilerinde elde edilen dayanım değerleri hemen kompaksiyon serisinde elde edilenlerden düşüktür. Yüksek plastisiteli özellik gösteren zemin-1 numunesi için gecikmiş kompaksiyonun dayanım açısından olumsuz bir etkisi olmuştur. Düşük plastisiteli zemin-2 örnekleri üzerinde gecikmiş kompaksiyon serisinde elde edilen SBD değerleri kür süresinin artışıyla birlikte yüksek değerler vermiştir. Gecikmiş kompaksiyon serisi kapsamında, %9 kireç muhtevasında örneklerin SBD değerleri 7 ve 28-gün kür sonrası sırasıyla 365 kPa'dan 1520 kPa'ya yükselmiştir.

Gecikmiş kompaksiyonun SBD değerleri üzerindeki etkisi 28 gün boyunca kürde bırakılan örneklerde çok daha etkili olmuştur.

Kireç katkısı kullanılarak yapılacak zemin stabilizasyonunda, özellikle uzun süreli gecikmiş kompaksiyon, zemin türüne bağlı olarak mühendislik özelliklerinde önemli etkilere neden olmaktadır. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde uygulanacak kireç stabilizasyonunda karışım sonrası beklemeden (hemen) yapılacak kompaksiyonun dayanım açısından daha olumlu olacağı, düşük plastisiteli kil zeminlerde ise gecikmiş kompaksiyonun dayanım üzerinde olumlu etkisinin olacağı önerilmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Alper BAŞPINAR, bilimsel yayın araştırması, zemin numunesi temini, deneylerin yapılması, makalenin oluşturulması; Murat TÜRKÖZ, deney tasarımının ve deneylerin yapılması, deney sonuçlarının analiz edilmesi, makalenin genel kontrolünün yapılması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Ali H. Mohamed M. (2017). The effects of compaction delay and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of lime-stabilized extremely high plastic clays. *Applied Clay Science*, 150, 333-341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.019>
- Al-Rawas A. A. Hago A. Al-Sarmi H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028>
- Anaokar M. and Mhaiskar S. (2020). Experimental and numerical assessment of efficacy of lime stabilized capping material in controlling swelling displacements within flexible pavement embankments. *Heliyon*, 6(9), e04961. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04961>
- ASTM D2166/D2166M-16 (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA. Erişim adresi : <https://www.astm.org/Standards/D2166>

- ASTM, E. (2007). 8/E 8M Annual book of ASTM standards. ASTM. Erişim adresi : <https://www.astm.org/Standard/alpha-lists/E.html>
- Basma A.A. and Tuncer E.R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation Research Board*, 1296, 54-61. Erişim adresi : <https://trid.trb.org/view/359115>
- Bell F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223-237. doi: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Cheng Y. Wang S. Li J. Huang X. Li C. Wu J. (2018). Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans. *Construction and Building Materials*, 187, 1031-1038. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.061>
- Di Sante M. Fratolocchi E. Mazzieri F. Brianzoni V. (2015). Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil-lime mixtures. *Engineering Geology*, 185, 131-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.005>
- Ford C.M. Moore R.K. Hasek B.F. (1982). Reaction products of lime treated southeastern soils. In *Transportation Research Record* 839, TRB, Washington, D.C., 38-40. Erişim adresi : <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1982/839/839-007.pdf>
- GhavamShirazi S. and Bilsel, H. (2020). Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay. *Acta Geotech.* doi: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01060-1>
- Ghobadi M.H. Abdilor Y. Babazadeh R. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 73(2), 611-619. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
- Gidday B.G. and Mittal S. (2020). Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime. *Heliyon* 6(2). doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03384>
- Jahandari S. Saberian M. Zivari F. Li J. Ghasemi M. and Vali R. (2019). Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2), 172-183. Doi: <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1329259>
- Mirzababaei M. Mirafteb M. Mohamed M. and McMahan P. (2013). Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,

139(3), 483-493. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792)

Mitchell J.K. and Hooper D.R. (1961). Influence of time between mixing and compaction on properties of a lime-stabilized expansive clay. *Highway Research Board Bulletin*, 304, 14-31. Erişim adresi : <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/304/304-002.pdf>

Moore J.C. and Jones R.L. (1971). Effect of soil surface area and extractable silica, alumina, and iron on lime stabilization characteristics of Illinois soils. In *Highway Research Record 351*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 87-92. Erişim adresi : <https://trid.trb.org/view/126621>

Osinubi K. J. (1998). Influence of compactive efforts and compaction delays on lime treated soil. *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 124(2), 149-155. Erişim adresi : <https://trid.trb.org/view/486952>

Parsons R.L. Johnson C.P. and Cross S.A. (2001). Evaluation of soil modification mixing procedures, Proceeding of 80th Annual Meeting, Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C. Erişim adresi : <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/14515>

Sweeney D.A. Wong D.K.H. and Fredlund D.G. (1988). Effect of lime on highly plastic clay with special emphasis on aging. *Transportation Research Board*, 1190, 13-23. Erişim adresi : <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1190/1190-002.pdf>