



EGE ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN KİL ZEMİNİN
SODYUM VE MAGNEZYUM SÜLFATLI
ÇÖZELTİLER ETKİSİNDE DAVRANIŞI**

İrem KALIPCILAR

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selim ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 621.01.00

Sunuş Tarihi : 24.06.2015

E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN KİL ZEMİNİN
SODYUM VE MAGNEZYUM SÜLFATLI
ÇÖZELTİLER ETKİSİNDE DAVRANIŞI**

İrem KALIPCILAR

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selim ALTUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 624.01.00

Sunuş Tarihi : 24.06.2015

Bornova-İZMİR

2015

İrem KALIPCILAR tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Çimento ile Stabilize Edilen Kil Zeminin Sodyum ve Magnezyum Sülfatlı Çözeltiler Etkisinde Davranışı” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 24.06.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Doç. Dr. Selim ALTUN
Raportör Üye	: Doç Dr. Alper SEZER
Üye	: Doç. Dr. Ali Hakan ÖREN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çimento ile Stabilize Edilen Kil Zeminin Sodyum ve Magnezyum Sülfatlı Çözeltiler Etkisinde Davranışı” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24 / 06 / 2015

İmzası

İrem KALIPCILAR

ÖZET**ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN KİL ZEMİNİN SODYUM
VE
MAGNEZYUM SÜLFATLI ÇÖZELTİLER ETKİSİNDE
DAVRANIŞI**

KALIPCILAR, İrem

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selim ALTUN

Haziran 2015, 80 sayfa

Bu tez çalışmasında çimento ile stabilize edilen zeminlerin sülfat etkisi altında dayanım, geçirimsizlik ve stabilite özelliklerindeki değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla; serbest basınç dayanımı, klor-iyon geçirgenliği, donma-çözülme ve bir boyutlu şişme deneyleri yapılmıştır.

Çimento stabilizasyonunda normal portland çimentosu, puzolanik çimento ve sülfata dayanıklı olmak üzere 3 farklı tip çimento kullanılmıştır. Örnekler % 0, 5, 10 ve 15 oranında çimento içeriğinde sıkıştırılmış ve sülfat etkisinin incelenebilmesi amacıyla magnezyum ve sodyum sülfata maruz bırakılmıştır. 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süresinden sonra örneklerin dayanımlarında ve geçirimsizliklerinde oluşan değişimler belirlenmiştir. Bir boyutlu şişme deneyinde ise, sabit bir şişme değeri elde edene kadar 24 saatte bir ölçüm alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda çimento içeriğinin ve kür süresinin artışı ile birlikte dayanım artmış, geçirimsizlik ise azalmıştır. Ortamda sülfat bulunduğu ise etrenjit sebebi ile oluşan mikro çatlaklar dayanımın azalmasına ve geçirimsizliğin artmasına neden olmuştur. Bir boyutlu şişme deneylerinde ise çimento katkısının çimento içermeyen örneklere göre şişme miktarını azalttığı belirlenmiştir. Ancak, optimum çimento içeriğinin % 10 olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Çimento ile stabilize edilmiş kil, serbest basınç deneyi, sülfat etkisi, bir boyutlu şişme

ABSTRACT**THE BEHAVIOR OF CEMENT STABILIZED CLAY EXPOSED
TO
MAGNESIUM AND SODIUM SULFATE SOLUTIONS**

KALIPCILAR, İrem

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selim ALTUN

June 2015, 80 pages

In this thesis, strength, permeability and stability properties of cement stabilized soil exposed to sulfate salts were investigated. For this purpose, unconfined compression tests, chloride-ion penetration tests, freezing-thawing tests and one dimensional swelling tests were conducted.

Three different type of cement such as ordinary portland cement, pozzolanic cement and sulfate resistance cement were chosen for cement stabilization. Specimens were compacted at 0, 5 ,10 and 15 % cement inclusion level, then exposed to magnesium and sodium sulfates in order to observe sulfate effect. After 1, 7, 28 and 90 curing days, alteration on strength and permeability were determined. In one dimensional swelling test, the swelling values were recorded in every 24 hours until a constant value were obtained.

According to the results obtained from experimental work, an increase in cement inclusion level and curing time were led to increase in strength and decrease in permeability. Besides, micro cracks caused by ettringite formation induced strength loss and decreasing permeability. In one dimensional swelling tests, the swelling values decreased by cement addition. However, the optimum cement inclusion level were obtained as % 10.

Keywords: Cement stabilized clay, unconfined compression test, sulfate effect, one dimensional swelling.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezini bana öneren ve alıŐma süresince değerli grŐlerinden yararlandığım danıŐmanın Do. Dr. Selim Altun'a, tez süresince ilgisini esirgemeyen ve tezin biçimlenmesinde değerli katkıları bulunan Doç. Dr. Alper Sezer'e, Doç. Dr. Gözde İnan Sezer'e ve Doç. Dr. Ali Hakan Ören'e en içten teŐekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tezin tamamlanmasında desteği bulunan TUBİTAK'a (Proje numarası 113M202) teşekkür ederim.

Her koŐulda bana destek olan ArŐ. Gör. Cansu Özyaman'a, her zaman yanımda olmasını dilediğim sevgili ArŐ. Gör. Baran Bozyiğit'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde bana destek olan, her daim emeklerini üzerimde hissettiğim annem Asuman Kalıpcılar'a, babam Koray Kalıpcılar'a ve tüm aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

İrem Kalıpcılar

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxi
1.GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Projenin Önemi.....	2
1.3 Projenin Kapsamı	3
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1 Çimento Stabilizasyonunun Mekanizması	5
2.2 Çimento Stabilizasyonuna Etki Eden Faktörler.....	6
2.2.1 Kür süresinin etkisi	7
2.2.2 Kür koşullarının etkisi	9
2.2.3 Zemin özelliklerinin etkisi.....	10
2.3 Çimento Stabilize Zeminlerde Sülfat Etkisi	13
2.4 Çimento Stabilize Zeminlerde Donma Çözülmenin Etkisi.....	15
3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	18

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
3.1 Montmorillonit Kilinin Özellikleri	18
3.2 Kaolin Kilinin Özellikleri	19
3.3 Kullanılan Çimentoların Özellikleri	21
3.4 Ön Çalışma Kapsamında Örneklerin Hazırlanması.....	23
3.5 Örneklerin Hazırlanması.....	26
3.5.1 Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması.....	27
3.5.2 Klor-iyon deneyi örneklerinin hazırlanması	28
3.5.3 Donma- çözülme deneyi örneklerinin hazırlanması	30
3.5.4 Serbest şişme deneyi örneklerinin hazırlanması.....	33
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	35
4.1 Ön Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar	35
4.1.1 Çimento stabilizasyonunun kompaksiyon özellikleri üzerine etkisi	35
4.1.2 Çimento içeriğinin dayanım özelliklerine etkisi.....	36
4.1.3 Sülfat çözeltilerinin dayanım özelliklerine etkisi	37
4.1.4 Gerilme-deformasyon ilişkisinin incelenmesi	41
4.1.5 Klor-iyon geçirgenlik özelliklerinin incelenmesi	43
4.2 Deneysel Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar	45
4.2.1 Çimento stabilizasyonunun atterberg limitlerine etkisi	45

İÇİNDEKİLERSayfa

4.2.2 Dayanım özelliklerinin incelenmesi	46
4.2.3 Sülfatın dayanım özellikleri üzerindeki etkisi	49
4.2.4 Donma-çözülmenin dayanım özellikleri üzerindeki etkisi	55
4.2.5 Geçirimlilik özelliklerinin incelenmesi	60
4.2.6 Şişme özelliklerinin incelenmesi	64
4.2.7 Gerilme –deformasyon ilişkisinin incelenmesi	69
5. SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	78
ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Kaolin kilinin dane çapı dağılım eğrisi	20
3.2 Üç farklı tip çimento içeren harçların basınç dayanımları.....	23
3.3a 7 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağıtılmış serbest basınç deneyi örnekleri	24
3.3b 7 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağılmış geçirimsizlik deneyi örnekleri	24
3.4 21 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağılmamış örnekler	25
3.5 Farklı tipte olmak üzere % 15 çimento içeren örneklerin Standart Proktor eğrileri.....	26
3.6 Serbest Basınç Deneyi Örnekleri	28
3.7 Klor-İyon Geçirgenliği Deneyi Örnekleri.....	29
3.8 ASTM C1202 Klor-iyon geçirgenliği deney cihazı.....	29
3.9 Bir boyutlu serbest şişmenin belirlenebilmesi için gerekli düzenek (Örneğin çapı ve yüksekliği sırası ile 50 ve 25 mm.'dir)	33
4.1 Çimento stabilize montmorillonit kilinin sıkışma eğrileri	36
4.2 Farklı çözeltilerde bekletilen örneklerin çimento içeriklerine bağlı olarak serbest basınç dayanımlarındaki değişim	37
4.3 Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin 1 gün süre ile farklı çözeltilerde bekletildikten sonra elde edilen serbest basınç dayanımları.....	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 Çözeltide bekletilme süresinin ve çimento içeriğinin magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi	39
4.5 Çözeltide bekletilme süresinin ve çimento içeriğinin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi	40
4.6 Çimento tipinin ve çözelti konsantrasyonunun % 15 oranında çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi	40
4.7 Farklı konsantrasyonlarda bekletilen örneklerin serbest basınç deneyi davranışları	41
4.8 Farklı konsantrasyonlarda bekletilen örneklerin sekant modülleri	42
4.9 Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	43
4.10 28 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen ve Normal Portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirimsizlikleri.....	44
4.11 28 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen ve Normal Portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirimsizlikleri.....	44
4.12 Çimento içeriğinin Atterberg limitlerine etkisi.....	45
4.13 Çimento içeriğinin ve türünün serbest basınç dayanımına etkisi.....	47
4.14 7 gün kür süresine sahip örneklerin çimento içeriğine bağlı olarak serbest basınç dayanımı değişimi	48
4.15 Kür süresinin % 5 ve %15 çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.16a % 5 çimento içeren örneklerin sodyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	51
4.16b % 10 çimento içeren örneklerin sodyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	51
4.16c % 15 çimento içeren örneklerin sodyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	51
4.17a % 5 çimento içeren örneklerin magnezyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	54
4.17b % 10 çimento içeren örneklerin magnezyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	54
4.17c % 15 çimento içeren örneklerin magnezyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi.....	54
4.18 Farklı oranlarda normal portland çimentosu içeren örneklerin donma çözülme altında serbest basınç değişimi.....	56
4.19 Farklı oranlarda sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin donma çözülme altında serbest basınç değişimi.....	57
4.20 Sülfat ve normal portland çimentosu içeren örneklerin donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.....	58
4.21 Sülfat ve sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımları.....	59
4.22 Portland çimentosu içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.23 Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri	62
4.24 Puzolanik çimento içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri	62
4.25a Suda bırakılmış normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	65
4.25b Suda bırakılmış sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	65
4.25c Suda bırakılmış puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	65
4.26a Magnezyum sülfat çözeltisine bırakılmış normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	66
4.26b Magnezyum sülfat çözeltisine bırakılmış sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	66
4.26c Magnezyum sülfat çözeltisine bırakılmış puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	66
4.27a Sodyum sülfat çözeltisine bırakılmış normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	68
4.27b Sodyum sülfat çözeltisine bırakılmış sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	68
4.27c Sodyum sülfat çözeltisine bırakılmış puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.28 Farklı oranlarda normal portland çimentosu içeren örneklerin aksenal gerilme ve aksenal deformasyon davranışları.....	70
4.29 Magnezyum Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki	71
4.30 Sodyum Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	72
4.31 Çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kür süresinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Cement Deep Mixing Methods Association, 1999).	8
2.2 Çimento katkılı ve katkısız örneklerin serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü (Sariosseiri & Muhunthan 2009)	12
2.3 Kil mineralleri ile çimentomsu ürünlerin nicel oranları (Chew vd. 2004)	13
2.4 Farklı donma çözülme döngüleri sonrasında farklı güçlendirme yöntemleri ile iyileştirilen örneklerin serbest basınç dayanımları (Güllü and Khudir, 2014).....	17
3.1 Çalışmada kullanılması planlanan montmorillonit killerin indis özellikleri	19
3.2 Montmorillonit kilinin kimyasal ve fiziksel özellikleri	19
3.3 Kaolin kilinin indeks özellikleri	20
3.4. Kaolin kilinin kimyasal bileşenleri	20
3.5 Normal Portland çimentosunun ile sülfata dayanıklı çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	21
3.6 Normal Portland Çimentosunun, Sülfata Dayanıklı Çimentonun ve Puzolanik Çimentonun Kimyasal Özellikleri	22
3.7 Donma-çözülme deneyleri örnek listesi	31
3.8 Serbest basınç dayanımı, klor-iyon geçirimsizlik deneyleri örnek listesi.....	32
3.9 Serbest şişme deneyleri için örnek hazırlama listesi	34
4.1 Farklı tipte ve oranlarda çimento içeren örneklerin sülfat etkisi altında elde edilen serbest basınç dayanımları	55

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış, bu artışa paralel olarak yapılaşmayı ve sınırlı alanlarda kurulan şehirlerde daha fazla bölgenin yapılaşmaya açılması zorunluluğunu doğurmuştur. Bu zorunluluk, mühendislik özellikleri iyi olmayan zeminlerin üzerindeki arazilerde yapılaşma gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Öte yandan, kullanılabilir arazinin azalması sonucu var olan inşaata açık bölgelerin değeri artmış, bu da temel zemininin iyileştirilmesini ekonomik anlamda fizibil hale getirmiştir. Bu noktadan hareketle, binaların ve ulaştırma yapılarının mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi gereken zeminler üzerinde yapılması gerekliliği, zeminlerin stabilize edilmesi düşüncesini de beraberinde getirmiştir.

Çimento ile zeminlerin stabilizasyonu, son yüzyılda kullanılan ve zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde oldukça büyük faydalar sağlayan bir yöntemdir. Dayanımda sağladığı artışın yanı sıra, geçirimsizlikte sağladığı azalma, zeminin hacimsel stabilitesini arttırması bu yöntemin sağladığı faydalardan birkaçıdır. Ancak, stabilize edilen zeminde ya da ortamda sülfat bulunması halinde oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu dayanım azalmakta ve hacimsel stabilite bozulmaktadır. Bu durumda, çimento ile stabilize edilen zeminde meydana gelen değişimlerin incelenmesi ve zeminde oluşabilecek hasarların minimize edilmesi gerekmektedir. Ülkemizde, sülfatın çimento stabilize zeminler üzerindeki etkisi bilimsel olarak incelenmemiştir. Ayrıca, sülfat etkisi ile oluşan şişmenin deneysel olarak belirlenebilmesi için bir test metodunun geliştirilmemesi ve oluşan hasarların onarımının yüksek bütçelere mal olması sülfatın çimento stabilize zeminler üzerindeki etkisinin araştırılması gerekliliğini doğurmuştur. Aynı zamanda, mevsimsel döngüler içerisinde gerçekleşen donma çözülmenin sülfat içeren zeminlerde meydana getireceği hasar da literatürde henüz incelenmemiş olup, bu çalışmanın literatürdeki bu eksiklikleri gidermesi öngörülmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Ülkemizde büyük şehirlerde artan nüfus, yapılaşmanın artmasına ve dolaylı olarak da yapılaşmaya elverişli olmayan bölgelerde olmak üzere birçok alanın yapılaşmaya açılmasını gerektirmektedir. Günümüzde yapılaşmaya açılan ve yetersiz mühendislik özelliklerine sahip yerleşim bölgelerinin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi bir gereklilik halini almaktadır. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan çimento stabilizasyonu ekonomik ve kolay

uygulanabilirliği açısından sıklıkla tercih edilmektedir. Çimento stabilizasyonu ile iyileştirme yöntemi birçok araştırma ile irdelenmiş olmakla beraber sülfatlı suların imento stabilize zeminler üzerindeki etkisi üzerine literatürde çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda, sülfat etkisinin ve donma/çözülme etkisinin imento stabilize zeminlerin özelliklerine etkisi deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır. Çimento tipi, kr süresi, imento içeriği, sülfat tipi ve konsantrasyonu değişken parametreler kabul edilerek bu parametrelerin dayanım, geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın amaçları aşağıda başlıklar altında değerlendirilmiştir:

a) imento stabilizasyonunun zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi birçok çalışmada incelenmiş ancak sülfatlı yer altı suları altındaki davranışları araştırılmamıştır. Bu nedenle, imento stabilize zeminlerin mühendislik özelliklerindeki değişimlerin değişik sülfat türlerine ve konsantrasyonlarına bağlı olarak gözlemlenmesi çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır.

b) imento stabilize zeminlerin mühendislik özelliklerinin kr süresine ve imento türüne bağlı olarak değerlendirilmesi ve sülfata dayanıklı çimentonun sülfat etkisi altındaki zeminlerde sağlayacağı faydaların araştırılması amaçlanmaktadır.

1.2. Projenin nemi

Çimento stabilizasyonu sonucunda oluşan çeşitli kimyasal reaksiyonlar, zeminin dayanımını arttırmakta ve zemin içerisindeki boşlukları azaltarak geçirimsizliği dşurmektedir. Ancak, stabilizasyon ile dayanım kazanmış zeminlerin sülfatlı sular etkisinde mühendislik özellikleri olumsuz olarak etkilenmektedir. Sıklıkla kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan imento stabilizasyonun sağladığı faydalar bilinmekle beraber dayanım, geçirimsizlik performanslarının sülfat etkisi altında incelenmesi mühendislik anlamında bir gereklilik halini almaktadır. Bu alışma ile beraber Türkiye’de üretilen çimentolar ile stabilize edilen kil zeminlerin sülfat etkisinde değişen mühendislik özellikleri incelenecektir.

Ayrıca, literatürde, sodyum sülfat ile magnezyum sülfat zltilerinin imento stabilize zeminlerde oluşturacağı etkilerin ayrı ayrı değerlendirildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Farklı türdeki sülfat tuzlarının stabilize zeminlerde oluşturduğu etkilerin farklı olacağı dşnlmekte ve bu çalışmanın sülfat

etkisindeki zeminlerin stabilizasyonunda bir kaynak oluşturacağı düşünülmektedir.

1.3. Projenin Kapsamı

Tez çalışmasında, sülfat etkisinin çimento stabilize killerin mühendislik özelliklerine etkisi incelenecektir. Bu amaçla, belirlenen su içeriklerinde sıkıştırılacak çimento stabilize kil zeminler, değişik tipte ve konsantrasyonda tuz içeren sülfatlı sulara maruz bırakılarak, dayanım, hacimsel stabilite ve geçirgenliğindeki değişimler araştırılmış, sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Çalışmada kil zemin, üç tip çimento (normal Portland, puzolanlı çimento ve sülfata dayanıklı) kullanılarak stabilize edilmiştir. Çimento içeriği % 0, 5, 10 ve 15 olarak öngörülmüştür. Öngörülen karışımların Standart Proktor deneyleri ile optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilerek, örnekler bu parametrelere dayanarak hazırlanmıştır. Sülfat tipi olarak sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri seçilmiştir. Bu çözeltilerin konsantrasyonları, yapılan ön çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Bu çözeltilerde yukarıda belirtilen örneklerin kür süresi olarak da 1, 7, 28 ve 90 gün seçilmiştir. Karşılaştırma için, ayrıca kontrol grubu hazırlanmıştır.

Bu değişkenler göz önüne alınıp dayanım ve geçirimsizlik deneyleri için, 3 tip çimento, 3 tip çimento içeriği, 2 değişik tuz, 4 kür süresi düşünüldüğünde, kontrol örnekleri de hesaba katılarak, 116'şar set örnek hazırlamak gerekmektedir. Hacimsel stabilite için hazırlanacak örnek sayısı 27'dir. 116 set örnek üzerinde yapılan serbest basınç dayanım deneyleri ile bu deneyden elde edilen serbest basınç dayanımı veya kohezyon değerinin öngörülen değişkenler ile değişimi araştırılacaktır. Öte yandan, aynı miktarda örnek, klor iyon geçirgenlik cihazında deneylere tabi tutularak, örneklerin geçirgenliğinin öngörülen değişkenlere bağlı olarak değişimi araştırılacaktır. Sülfat çözeltisi etkisindeki çimento stabilize zeminlerin donma çözülme direnci de donma çözülme deneyleri sonucunda incelenecektir. Bu nedenle 2 tip çimento, 3 farklı oranda çimento içeren örnekler, 2 değişik sülfat tuzu etkisi altında, 2 farklı sürede kürlenmiş örnekler ile kontrol grupları hazırlanmıştır. Böylece, donma çözülme deneyi için 25 adet örnek seti hazırlanmıştır. Örnekler 6 ve 12 çevrimlik donma çözülme deneyine tabi tutulduktan sonra, dayanım kayıplarının incelenmesi amacıyla serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Hacimsel stabilitenin araştırılması için ASTM 4546 standartlarına uygun olarak ölçüm alabilen basit bir cihaz kullanılarak bir boyutlu

genleşme miktarları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların yukarıdaki değişkenlere bağlı olarak değişiminin karşılaştırmalı olarak ortaya konulması düşünülmektedir.

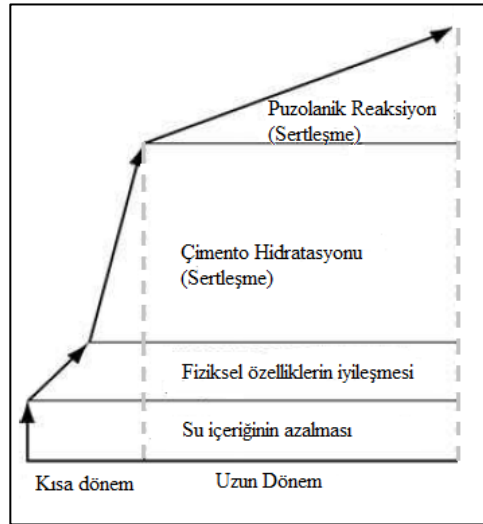
Yukarıda konusu verilen tezin amaç ile ilişkisini tanımlamak istersek, çimento stabilize zeminlerin dayanım, indeks ve sıkışma özelliklerinde değişimler pek çok çalışmada ortaya konulmasına rağmen, bu tip karışımların dayanıklılığı üzerine çalışmalar nadirdir. Çalışmanın birinci amacı, Türkiye’de yapılmış hiçbir çalışmaya rastlanmamış bu konuda bir referans oluşturmaktır. Öte yandan, yukarıda özetlenen ve oldukça büyük hasarlara yol açan sülfat etkisinin, çimento stabilize zeminlerin dayanım, hacimsel stabilite ve geçirimsizlik özellikleri ile ilişkisinin ortaya konulması ve meslektaşlarımızın bu iyileştirme yöntemini seçerken çoğunlukla göz ardı ettikleri bu etki konusunda farkındalık yaratılması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, zeminlerde çimento stabilizasyonu sonucunda oluşan mekanizmalar, zeminlerin geoteknik özelliklerindeki değişimler ve çimento stabilize zeminler üzerindeki sülfat etkisi açıklanacaktır.

2.1. Çimento Stabilizasyonunun Mekanizması

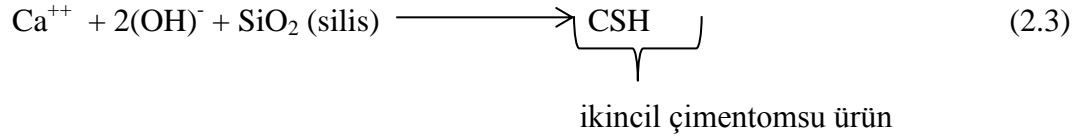
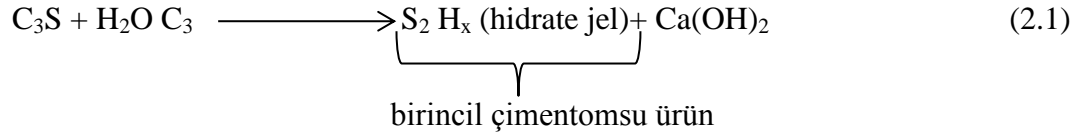
Çimento stabilize zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine birçok araştırma mevcuttur. Çimento stabilizasyonunun temel mekanizması Schaefer et. al (1997) tarafından özetlenmiştir. Stabilizasyon mekanizması 4 farklı adımdan oluşmaktadır; bağlayıcının hidrasyonu, iyon değişimi, çimento hidrasyon ürünlerinin oluşumu ve puzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşumu (Kitazume and Terashi, 2013). Stabilizasyon mekanizması Şekil 2.1’ de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Çimento stabilizasyonu mekanizması (Kitazume and Terashi, 2013)

Çimento stabilizasyonu ile iyileştirilmiş zeminlerin mühendislik özelliklerindeki değişim stabilizasyon mekanizmasından da anlaşılacağı üzere çimento ile zemin matrisinde birincil ve ikincil çimentomu su ürün oluşmasına neden olan zemin-çimento reaksiyonları ile açıklanabilmektedir (Mitchell, 1981; Kezdi, 1979; Scheafer 1997). Çimentonun içeriğindeki kalsiyum hidratlar (C_3S , C_2S , C_3A) ve kalsiyum ferrit (C_4A) dayanımı arttıran dört temel bileşendir. Zemin içerisindeki boşluk suyu çimento ile temasa geçtiğinde hızla hidrasyon gerçekleşmekte ve birincil çimentomu su ürün olan hidrate kalsiyum silikat (C_2SH_x ,

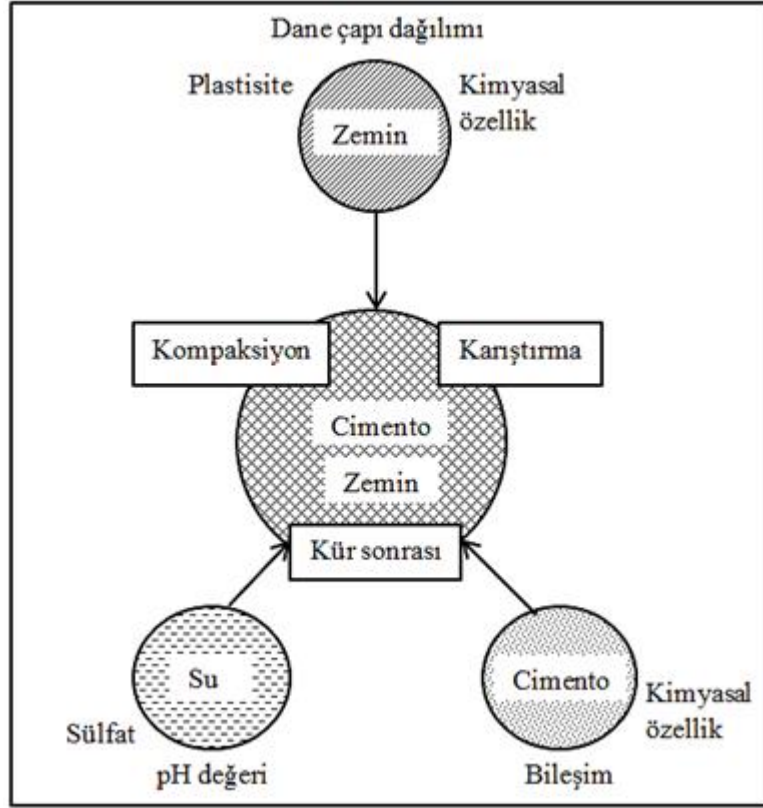
$C_3S_2H_x$), hidrate kalsiyum alüminat (C_3AH_x , C_4AH_x) ve sönmüş kireç $Ca(OH)_2$ oluşmaktadır. Sönmüş kireç ile kil içerisinde bulunan alümin ve silis mineralleri arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar ilave hidrate kalsiyum silikat ve hidrate kalsiyum alüminat oluşumuna yol açmaktadır. Zemin ile çimento arasında meydana gelen bu reaksiyonlar çimento stabilize zeminlerdeki dayanım artışını açıklamaktadır (Chew et al., 2004). Çimento ile zemin arasında meydana gelen reaksiyonlar çeşitli eşitlikler ile ifade edilmiştir (Kamruzzaman, 2002).



2.2. Çimento Stabilizasyonuna Etki Eden Faktörler

Çimento stabilize zeminler, plasitite, sıkışabilirlik, dayanım, hacim değişimi, deformasyon, geçirimsizlik ve donma dayanımı özellikleri ile değerlendirilebilmektedir. Bu özellikler; çimento ile zemini karıştırma yöntemlerine, çimento içeriğine, sıkıştırma derecesine, sıkıştırma tekniğine ve kür şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Çimento stabilize zeminlerin özelliklerini etkileyen faktörler Şekil 2.2’de özetlenmiştir (Kezdi, 1979). Çimento tipi ve kimyasal bileşenleri çimento stabilize zeminlerin dayanımlarını büyük ölçüde etkilemekte, ayrıca çimento içeriğinin artışı ile dayanım artmaktadır. Literatürde, çimento içeriği artışının dayanımda belirgin bir artışa neden olduğu ancak dayanım artışı için en az % 5 oranında çimento katkısına ihtiyaç duyulduğu ayrıca belirtilmiştir (Sariosseiri & Muhunthan 2009). Bununla birlikte, zeminin fiziko-kimyasal özellikleri de (dane çapı, su içeriği, Atterberg limitleri, kil minerallerinin türü, katyon değişim kapasitesi, çözünebilir silis ve alümin miktarı, organik

madde içeriği, boşluk suyu pH'ı) çimento stabilize zeminlerin özelliklerini belirlemektedir (Porbaha et al.,2000).



Şekil 2.2. Çimento stabilize zeminlerin özelliklerine etki eden faktörler (Kezdi, 1979).

2.2.1. Kür süresinin etkisi

Serbest basınç dayanımı, q_u zemin türünden bağımsız olarak kür süresinin artışı ile birlikte artmaktadır (Wang et al. 2013; Horpibulsuk et al. 2012; Horpibulsuk et al. 2011; Lorenzo & Bergado 2006). Kür süresinin dayanım artışı üzerindeki etkisi büyük oranlarda çimento içeren zeminlerde daha baskın olarak gözlemlenmektedir (Kitazume & Terashi 2013). Çimento miktarı arttıkça, çimento ile zemin arasında meydana gelen hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar sonucunda daha fazla miktarlarda birincil ve ikincil çimentomsu ürünler oluşmaktadır. Dolayısı ile kür süresi ile dayanım artışı, daha düşük oranlarda çimento içeren zeminlere oranla daha yüksek olmaktadır. Ancak, aynı oranda çimento içeren çimento stabilize zeminlerin kür süreleri ile dayanımları arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Cement Deep Mixing Methods Association (1999) organik ve kohezif olmak üzere iki farklı zemin türünün 28 ve 7 günlük dayanımları arasındaki oranın (q_{u28}/q_{u7}) 1 ile 2 arasında değiştiğini ve bu değer

organik zeminler için ortalama 1.44, kohezif zeminler için ise ortalama 1.57 olduğunu vurgulamışlardır. Saitoh (1988) farklı zemin türleri kullandığı çalışmasında 7, 28 ve 91 olmak üzere 3 farklı kür süresinde serbest basınç ilişkisini incelemiştir. Kil ve kum zeminler için 28 ve 7 günlük serbest basınç dayanımı oranının (q_{u28}/q_{u7}), 1.4 ile 2.3 arasında 91 ve 7 günlük serbest basınç dayanımı oranının da (q_{u91}/q_{u7}) 1.8 ile 5.9 arasında değiştiğini belirtmiştir. Cement Deep Mixing Methods Association (1999)'un iki farklı çimento tipinde stabilize edilen zeminlerin 7, 28 ve 91 günlük kür süreleri ile serbest basınç ilişkileri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Kür süresinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Cement Deep Mixing Methods Association, 1999).

	Normal Portland çimentosu	Yüksek fırın cüruf çimentosu
$q_{u7} - q_{u28}$	$q_{u28} = 1.49 q_{u7}$	$q_{u28} = 1.56 q_{u7}$
$q_{u7} - q_{u91}$	$q_{u91} = 1.97 q_{u7}$	$q_{u91} = 1.95 q_{u7}$
$q_{u28} - q_{u91}$	$q_{u91} = 1.44 q_{u28}$	$q_{u91} = 1.20 q_{u28}$

Uddin et al. (1997) belirli kür süresi sonrasında (> 4 ay) serbest basınç dayanımı artışı hızının neredeyse ihmal edilebilir olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, Porbaha et al. (2000) da dayanım artışının genellikle ilk dönemlerde daha hızlı gerçekleştiğini ve zamanla azaldığını bildirmiştir. Mitchell (1981)'de serbest basınç dayanımı (q_u) ve kür süresi (t), çimento içeriği (C) arasındaki ilişkiyi ampirik formüller yardımı ile belirlemiştir (Kamruzzaman, 2002).

$$q_u(t) = q_u(t_0) + K \log(t/t_0) \quad (2.5)$$

Burada, $q_u(t)$: t gündeki serbest basınç dayanımı, kPa

$q_u(t_0)$: t_0 gündeki serbest basınç dayanımı, kPa

K: granüler zeminler için $480 \times C$ ve ince daneli zeminler için $70 \times C$

C: kütlece % cinsinden çimento içeriği

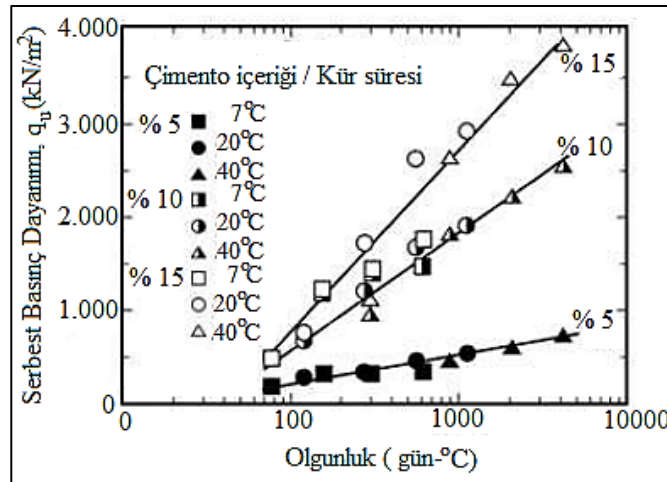
2.2.2. Kür koşullarının etkisi

Kür süresi, çimento stabilize zeminlerin dayanım artışını etkileyen dominant faktörlerden biri olmakla beraber kür koşulları da dayanım özelliklerinin etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Kitazume and Terashi (2009) örnek hazırlama metodunun, kür koşullarının çimento stabilize killerin serbest basınç dayanımının üzerindeki etkisini araştırmışlardır. % 5, 10 ve 15 oranında çimento içeren örnekler farklı sıcaklıklarda farklı kür süresinde bekletilerek dayanım kazanmaları sağlanmıştır. Kür sıcaklığının ve kür süresinin ortak etkisini “olgunluk” olarak ifade edilmiş ve aşağıda verilen formül ile tanımlanmıştır.

$$M = \int_0^{T_c} 2 \exp\left(\frac{t+10}{10}\right) dT_c \quad (2.6)$$

Burada, t kür sıcaklığı (°C) ve T_c ise kür süresi (gün) dir. Farklı çimento içeriğine sahip örnekler için ayrı olarak serbest basınç dayanımı ve olgunluk ilişkisi grafiksel olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

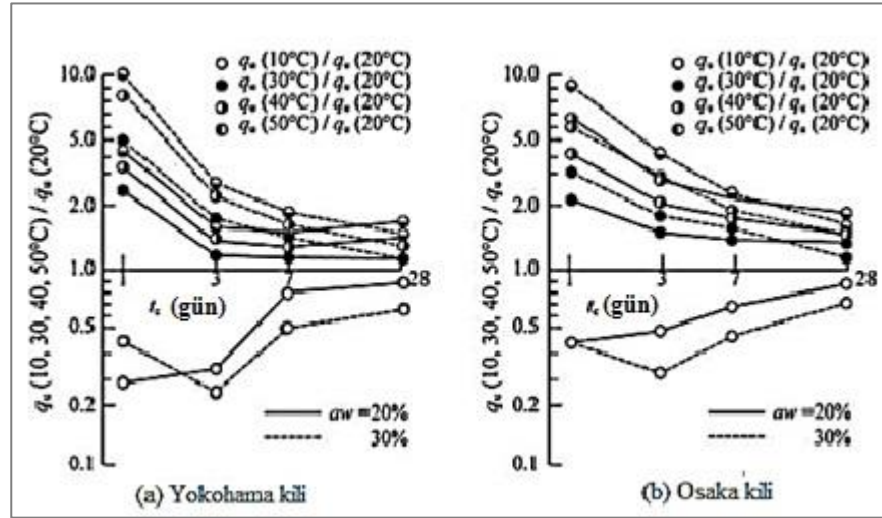


Şekil 2.3. Serbest basınç dayanımı ve olgunluk arasındaki ilişki (Kitazume and Terashi, 2009)

Kido et. al (2009) çimento stabilize turba zeminlerin serbest basınç dayanımları ile kür sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Hokkaido bölgesinden alınan zemin örneğinin doğal su içeriği, dane birim hacim ağırlığı ve kızdırma kaybı sırasıyla % 550, 1.854 g/cm³ ve % 66 dır. Turba zemin ağırlıkça % 20, 30 ve 40 olmak üzere 3 farklı çimento içeriğinde ve iki farklı bağlayıcı ile (yüksek fırın cürufu B tipi çimento ve çimento bazlı özel bağlayıcı) stabilize

edilmiştir. Yüksek fırın cürufu çimentosu ile stabilize edildikten sonra 0 ve 5 °C sıcaklıkta kür süresi boyunca bekletilen örneklerde 20 °C sıcaklıkta bekletilen örneklere kıyasla serbest basınç dayanımlarında % 40'a varan azalmalar meydana gelmiştir. Aynı şekilde Enami et al. (1985) çalışmasında aynı kür süresinde, kür sıcaklığının artışı ile beraber serbest basınç dayanımının lineer olarak arttığını gözlemlemiştir.

Saitoh et al. (1980) Yokohama kili (w_L : % 95.4 ve w_p % 42.4) ve Osaka kili (w_L : % 79.4 ve w_p : % 40.2) olmak üzere iki farklı tür kili çimento stabilizasyonu sonrasında 4 hafta boyunca farklı kür sıcaklıklarında bekletmiştir. Şekil 2.4'te kür sıcaklığının serbest basınç dayanımına etkisi görülmektedir. Şekilde, farklı sıcaklıklarda bekletilmiş örneklerin serbest basınç dayanımları 20 °C'de bekletilmiş örneklerin serbest basınç dayanımları kullanılarak normalize edilmiştir. Yüksek dayanım değerlerine yüksek kür sıcaklıklarında ulaşılmıştır. Kür sıcaklığının etkisi kısa süreli dayanımlarda uzun süredeki dayanıma oranla daha dominant olmaktadır (Kitazume and Terashi, 2013).

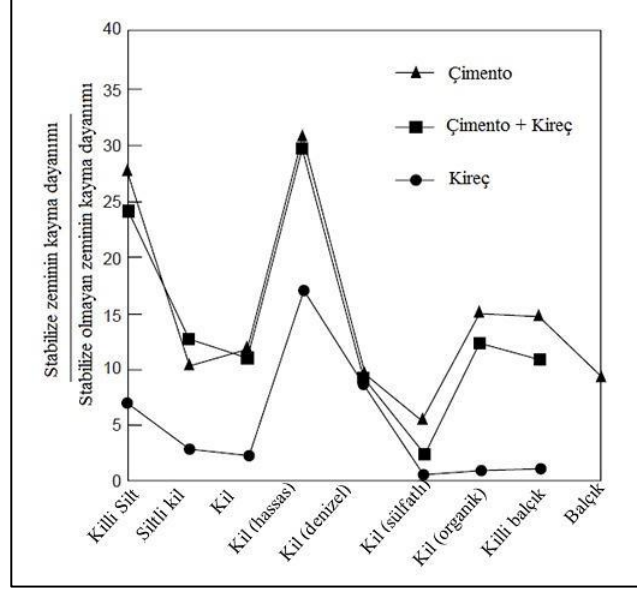


Şekil 2.4. Kür sıcaklığının çimento stabilize killerin serbest basınç dayanımına etkisi (Saitoh et al, 1980).

2.2.3. Zemin özelliklerinin etkisi

Dane çapı dağılımı, Atterberg limitleri, kil mineralleri, pH değeri gibi fiziksel ve kimyasal özellikler çimento stabilize zeminlerin stabilizasyon sonrası özelliklerini etkilemektedir. Ahnberg vd. (1995) farklı zeminlerin kireç ve çimento stabilizasyonu sonucunda dayanımlarındaki değişimleri incelemiştir. Çalışmalarında, stabilizasyon sonucunda elde edilen kayma dayanımlarını aynı

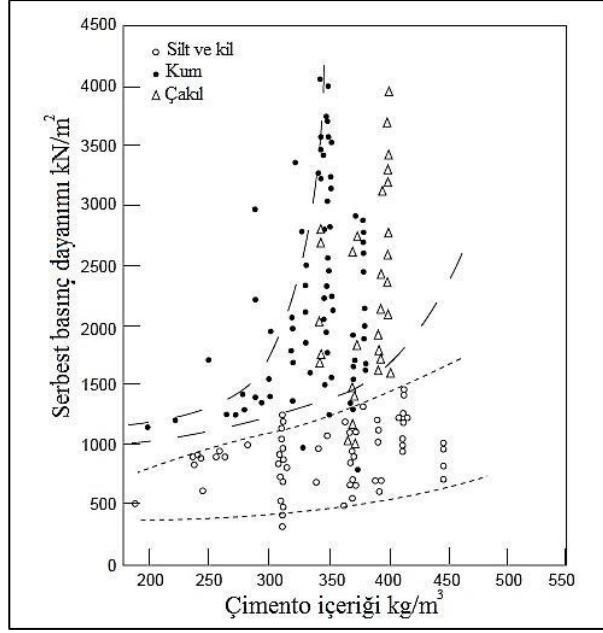
zemin türünde elde edilen kayma dayanımına oranlayarak her bir zemin türü için dayanım artışını belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre stabilizasyon sonucunda en büyük dayanım artışlarını killi siltlerde ve hassas killerde gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.5. Farklı stabilizasyon katkılarının İsveç zeminlerinin serbest basınç dayanımlarına etkisi (Ahnberg vd.,1995)

Taki and Yang (1991), çimento stabilizasyonunda farklı dane çapı dağılımının dayanım üzerindeki etkisini gözlemlemek amacı ile silt-kil, kum ve çakıl türü zeminleri farklı oranlarda çimento ile stabilize ederek serbest basınç dayanımlarındaki değişimi gözlemlemişlerdir (Şekil 2.6). Kil içeriğinin artışı ile birlikte yüzey alanı artmakta dolayısı ile aynı çimento içeriğinde serbest basınç dayanımında azalma meydana gelmektedir (Porbaha, 2000).

Sariosseiri and Muhunthan (2009) çalışmalarında Aberdeen, Everett ve Palouse bölgelerinden temin ettikleri sırası ile ML, SP-SM ve ML-CL türü zeminleri % 2.5, % 5, %7.5 ve % 10 oranlarında çimento ile stabilize ederek zemin türüne ve çimento içeriğine bağlı olarak dayanımlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında ayrıca iki farklı kür yöntemini de karşılaştırmışlardır. Bir grup örnek ıslak sünger üzerinde hava geçirmez kutuda 7 gün süre ile bekletilmiştir. Diğer grup örnek ise ilk 7 gün plastik örtü ile sarılmış halde ve ıslak sünger üzerinde hava geçirmez kutu içinde kürlenmiş daha sonra da 22 gün süre boyunca suda bekletilmiştir. Sariosseiri and Muhunthan (2009) deneysel çalışmalarını Çizelge 2.2’de özetlemişlerdir.



Şekil 2.6. Çimento stabilize zeminlerde zemin türünün serbest basınç dayanımına etkisi (Taki and Yang, 1991).

Çizelge 2.2 Çimento katkılı ve katkısız örneklerin serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü (Sariosseiri & Muhunthan 2009)

Zeminler	Çimento içeriği	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)		Elastisite Modülü (MPa)	
		Batırılmamış	Batırılmış	Batırılmamış	Batırılmış
Aberdeen	0	211.7	0	9.33	0
	2.5	389.3	0	40	0
	5	534.3	286.4	58	37
	7.5	843.8	975	99	65
	10	1735.4	1818	145.1	161
Everett	0	206.9	0	7.55	0
	2.5	371.1	231.8	34.2	25.9
	5	746.3	410.4	78.35	52
	7.5	1202.3	1104	131.7	112.9
	10	1816.6	1420.1	174.8	134.2
Palouse	0	294.3	0	14.76	0
	2.5	1077	719.1	105.9	57.1
	5	2270.2	1997	190	143.3
	7.5	4270.1	3328.3	253	198.3
	10	4736.7	4383.1	284.2	268.2

Chew et al. (2004) çimento stabilizasyonu sırasında kil zeminlerin kompozisyonlarını incelemiş ve farklı çimento içeriklerinde 28 gün sonrasında zemin bileşenlerinde değişimler gözlemlemiştir. Çizelge 2.3'te 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlarda çimento içeren örneklerdeki kil minerallerinin ve çimentomsu bileşenlerin ağırlıkları görülmektedir. Üç çimento içeriğinde de kaolin ortamda tükenmiştir. Bu durum, kaolin kilinin yüksek puzolanik davranışına sahip olması nedeniyle kil ve çimento arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlarda yer alması ile açıklanmaktadır (Chew et al., 2004).

Çizelge 2.3 Kil mineralleri ile çimentomsu ürünlerin nicel oranları (Chew et al., 2004)

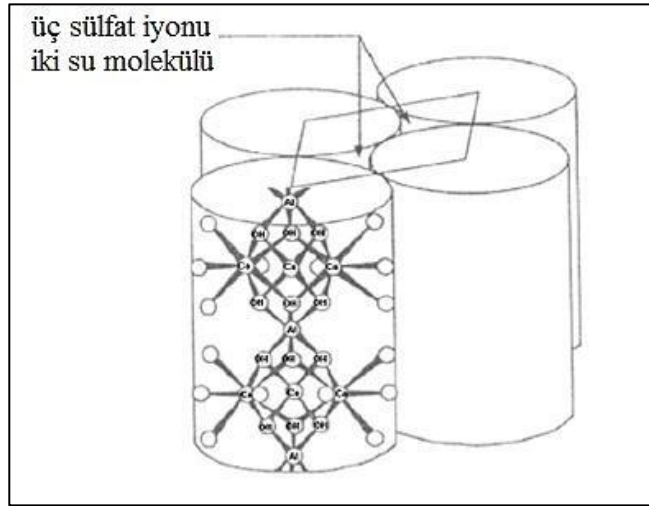
Normalize mineral ağırlığı (g)	Çimento içermeyen örnek	% 10 çimento içeren örnek	% 30 çimento içeren örnek	% 50 çimento içeren örnek
Toplam ağırlık (g)	100	110	130	150
İllit (g)	18	6	11	11
Quartz (g)	71	72	65	71
Kaolin (g)	11	0	0	0
CSH+CASH (g)	0	32	54	68

2.3. Çimento Stabilize Zeminlerde Sülfat Etkisi

Çimento stabilizasyonu, zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmekle beraber ortamda farklı minerallerin bulunması durumunda çimento stabilizasyonu beklenen performansı gösterememektedir. Zemin içerisinde bulunan ya da yeraltı suları ile taşınan farklı tiplerdeki sülfat tuzları çimento stabilize zeminlerde farklı etkilere yol açarlar.

Çimento ve kireç stabilize zeminlerde yüksek sülfat kaynaklı yıkıcı etkiler ilk olarak Mehra et al. (1955) ve Sherwood (1958) tarafından rapor edilmiştir. Mitchell (1986), Las Vegasta yapılan karayolunda kireç stabilizasyonu sonrasında yol yüzeyinde çatlaklar gözlemlemiştir. Çatlaklar oluşan karayolundan alınan örneklerin analizi sonucunda zeminin sodyum sülfat içerdiğini ve etrenjit oluşumunun gerçekleştiğini göstermiştir (Ouhadi and Yong, 2008).

Kalsiyum, sülfat ve alümin birleştiklerinde sülfat saldırısına neden olan etrenjiti ($3\text{CaSO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşturmaktadır. Taylor (1977)'de etrenjitin molekül hacminin 714 mL, suyun molekül hacminin ise 578 mL olduğunu belirtmiştir. Dolayısı ile etrenjit hacmi kendini oluşturan bileşenlere göre neredeyse % 200 artış göstereceğinden şişme ve çatlaklara neden olabilecektir. Etrenjitin iç yapısı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Etrenjitin yapısında üç tane farklı su molekülü bulunmaktadır: Kanaldaki su, kolonları sınırlayan su ve kolonların hidroksit iyonları olan su. Etrenjitin hacimsel değişimi genel olarak iki teori ile açıklanmaktadır: Kristal gelişimi ve genişleme teorisi (Cohen, 1983). İlk teoriye göre, genişleme, etrenjit oluşumunun diğer oluşumlar ile temasa geçmesi sonucu uygulanan basınç ile oluşmaktadır. İkinci teoriye göre, kolloid boyutundaki etrenjit danelerinin şişmesi ile genişleme oluşmaktadır (Wang, 2002).



Şekil 2.7. Etrenjitin yapısı (Wang, 2002)

Etrenjitin oluşumu için gerekli süre birkaç günden birkaç haftaya kadar olan bir yelpazede değişmektedir (Kota et al., 1996). Bu sürenin uzunluğu sülfatların çözünübilirliği, zemin danelerinden serbest kalan alümin miktarı ve bağlayıcılardaki kalsiyum miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Laboratuvar ortamında adı geçen değişkenler genellikle kontrol altında olduğundan, etrenjit mineralinin kimyasal stabilizasyon yapıldıktan sonra 24 saat içinde oluştuğu ve şişmenin en büyük değerine stabilizasyondan 7 gün sonra erişildiği gözlemlenmiştir (Inthrasombat, 2003).

Mikroyapısal ve genişlemeler açısından yapılan değerlendirmelerde, sülfat etkisinin etrenjit ve tomasit oluşumuna etkisi ve bunun ortamdaki sülfat konsantrasyonu, kütleme zamanı, v.b. parametreler ile değişimi ortaya

konulmuştur. Wang et al., (2005), kalsiyum sülfat içeren bir zemini çimento esaslı değişik karışımlarla (Kireç, Tip I Portland çimentosu, Tip I Portland Çimentosu+granüle yüksek fırın cürufu, Tip I Portland çimentosu+ C sınıfı uçucu kül+amorf silis, Tip I Portland çimentosu+ granüle yüksek fırın cürufu + silis dumanı) stabilize etmiştir. Çalışmada yapılan X ışını difraktometresi, termal analizler, taramalı elektron mikroskobu analizleri, kireçle stabilizasyonda, ortamda az miktarda kil minerali bulunsa da etrenjit oluşumunun hızlı bir biçimde başladığını göstermiştir. Ksibati and Huntington (1996), sülfat etkisine bağlı genişlemenin araştırılmasında kirece doygun suda kürlenmenin, nemli havada yapılan kürelemeye göre gerçek durumla daha iyi benzeşim gösterdiğini ileri sürmüştür. Değişik agregalar ile oluşturulan zemin-çimento karışımlarında oluşan genişlemelerin farklılığını, genişmeleri oluşturan mekanizmaların farklılığına bağlayan yazarlar, agrega içinde bulunan karbonatların, genişleme üzerinde büyük etkisi olduğunu savunmuşlardır. Öte yandan, zemin ile ilişkide olan beton yapı elemanlarında gözlenen sülfat etkisi, çimento, uçucu kül veya kireç ile stabilize edilmiş kaplamalarda da görülmektedir (ACI 230.1R).

Çimento stabilize zeminlerde sülfatın etkisi literatürde oldukça ciddi çalışmalarla incelenmiş olsa da, halen ülkemiz ve dünya literatüründe bazı eksikler göze çarpmaktadır.

2.4. Çimento Stabilize Zeminlerde Donma Çözülmenin Etkisi

Donma-çözülme olgusu soğuk bölgelerde zeminleri etkilemektedir. Zeminin boşluklarındaki su donma nedeni ile buz kristallerine dönüşmekte ve dolayısı ile hacmi su haline oranla artmaktadır. Ancak çözülme durumunda ise buz kristalleri tekrar suya dönüşmekte ve hacim yeniden azalmaktadır. Tekrar eden donma çözülme döngülerinde zemin yapısı bozulmaktadır (Ghazavi and Roustaie, 2010). Ancak, donma çözülme sonrası stabilize zeminlerin durabiliteleri stabilizasyon için kullanılan stabilizatör tipine ve oranına da bağlı olmaktadır (Olgun, 2013).

(Shibi and Kamei, 2014) çalışmalarında, kuru ağırlıkça % 5 çimento içeriği ile stabilize edilen ve farklı oranlarda basanite ve kömür külü içeren kili çeşitli donma-çözülme döngülerine maruz bırakmışlardır. Donma çözülme döngülerinden sonra örneklerin serbest basınç dayanımlarını ve çeşitli fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. İlk ve ikinci donma çözülme döngülerinden sonra serbest basınç dayanımında kayda değer bir düşüş daha sonraki donma çözülme

döngülerinde ise dayanımda belirgin olmayan kayıpların meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Literatürde, genellikle lif ile güçlendirilen veya kireç stabilize zeminlerin donma çözülme sonrası davranışları incelenmiştir. Yarbaşı et al (2007)'de iki farklı granüler zemini silika tozu-kireç, uçucu kül-kireç ve kırmızı çamur-çimento katkıları ile stabilize etmiş ve donma çözülme sonrası davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda, zemini silika tozu-kireç, uçucu kül-kireç ve kırmızı çamur-çimento katkıları ile stabilize edilmiş zeminlerin donma çözülme sonucunda durabilitelerinin stabilize edilmemiş örneklere kıyasla çok daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Kalkan (2009) çalışmasında, silika tozu ile stabilize edilen ince daneli zeminlerin donma çözülme sonrası geçirimsizlik ve dayanım özelliklerini incelemiştir. Deneyler sonucunda, silis tozu katkısının ince daneli zeminlerin donma çözülmeye karşı direncini arttırdığını gözlemlemiştir.

Güllü and Khudir (2014), jüt lifi, çelik lif ve kireç ile güçlendirilmiş ince daneli (düşük plastisiteli silt) zeminin donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımını incelemiştir. İyileştirme yöntemine bağlı olarak iyileştirilen zeminin gerilme-deformasyon davranışlarını (pik dayanım, pekleşme, duktilite, gevreklik indeksi ve rezilyans modülü) ayrıca gözlemlemiştir. Deneysel çalışmada örnekler, % 2, 4, 6, 8 ve 10 oranında kireç içeren örnekler % 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranında jüt ya da çelik lif ile güçlendirilmiştir. Yazarlar, 1, 2 ve 3 donma çözülme döngüsüne bırakılan örnekler incelendiğinde en avantajlı kireç ve lif oranlarının kireç için % 4, jüt lif için % 0.75 ve çelik lif için % 0.25 olduğunu belirtmişlerdir. Güllü and Khudir (2014) çalışmalarını Çizelge 2.4'te özetlemiştir.

Çizelge 2.4 Farklı donma çözülme döngüleri sonrasında farklı güçlendirme yöntemleri ile iyileştirilen örneklerin serbest basınç dayanımları (Güllü and Khudir, 2014)

İyileştirme Yöntemi			Serbest Basınç Dayanımları (kPa)			
% H Lif	% Ç Lif	% Kireç	0 D-Ç	1 D-Ç	2 D-Ç	3 D-Ç
0	0	0	220	206	156	144
0.25	0	0	946.5	765	506	587
0.50	0	0	1176	868	585	704
0.75	0	0	1000	1100	1230	700
1	0	0	1130	1450	1487	1205
0	0.25	0	540	480	250	125
0	0.5	0	550	475	330	210
0	0.75	0	551	478	350	200
0	1	0	701	542	360	200
0	0	2	400	-	-	-
0	0	4	700	-	-	-
0	0	6	702	-	-	-
0	0	8	704	-	-	-
0	0	10	704	-	-	-
0.75	0	4	1300	1240	1000	790
0	0.25	4	970	500	500	390
0.75	0.25	4	1300	1320	1110	900

*J Lif : Hintkeneviri lifi, Ç Lif : Çelik lif, D-Ç : Donma-çözülme

3. KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Tez kapsamında çimento stabilizasyonunun kil zeminin mühendislik özelliklerinde oluşturacağı gelişim (dayanım artışı ve permeabilite azalımı), daha sonra da sülfat etkisinin negatif etkileri araştırılacaktır. Montmorillonit tipi killer, bilindiği üzere, düşük dayanımlı ve suyun etkisi altında yüksek miktarda hacim değişimi gösteren killerdir. Diğer kil türlerine göre daha düşük dayanım özelliklerine sahip montmorillonit üzerinde yapılan çimento stabilizasyonu sonucu dayanımdaki artış miktarı oldukça yüksek olacağından, sülfat etkisi sonrasında dayanımda gözlenecek azalmanın daha net gözlenebileceği düşünülmüş ve deneysel çalışma için ilk aşamada montmorillonit türünde bir kil seçilmiştir. Daha sonra yapılan bu ön çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde, deneysel çalışmada kaolin kilinin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.1. Montmorillonit Kilinin Özellikleri

İşlenebilmenin etkisi de göz ardı edilmeden, laboratuvara getirilen aktif ve aktif olmayan olarak isimlendirilen, plastisite özellikleri farklı iki tür montmorillonitin Atterberg limitleri ve optimum su içerikleri ASTM D4318, ASTM D698 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Aktif ve aktif olmayan montmorillonit kilinin endeks özellikleri Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Çalışmaya uygun montmorillonit kili indeks özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir.

İlk örnekler hazırlanırken elde edilen laboratuvar deneyimi, ön çalışma programında yapılacak deneyler için hazırlanacak örneklerin aktif montmorillonite oranla daha düşük plastisite özelliğine sahip olduğundan dolayı aktif olmayan montmorillonit ile hazırlanmasına karar verilmiştir. Aktif olmayan montmorillonit kilinin kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılması planlanan montmorillonit killerinin indis özellikleri

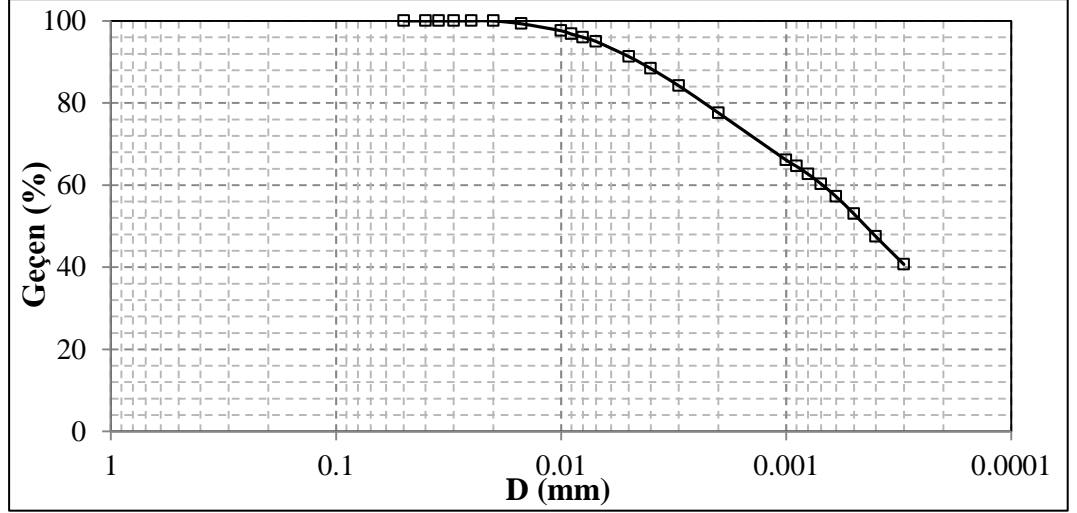
Montmorillonit Türü	Aktif Montmorillonit	Aktif olmayan Montmorillonit
Likit Limit	379	191
Plastik Limit	61	76
Plastisite İndisi	318	114
Optimum Su İçeriği (%)	52	45
Mak. Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	10.39	10.20

Çizelge 3.2 Montmorillonit kilinin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşen	Montmorillonit kili
SiO ₂ (%)	71
Al ₂ O ₃ (%)	14
Fe ₂ O ₃ (%)	0.7
CaO (%)	1.1
MgO (%)	3.2
TiO ₂ (%)	0.05
Na ₂ O (%)	0.25
K ₂ O (%)	1
Kızdırma Kaybı (%)	6
Özgül Ağırlık	2.35

3.2. Kaolin Kilinin Özellikleri

Yapılan ön çalışma sonrasında deneysel çalışmaya kaolin kili ile devam edilmiştir. Bu nedenle, homojen olması amacı ile aynı bölgeden temin edilen Hint kaolini kullanılmıştır. İlk olarak, kaolin kilinin indeks özellikleri, optimum su içeriği ve dane çapı dağılımı eğrisi sırası ile ASTM D 4318-10, ASTM D422 ve ASTM D698-07 standartları kullanılarak elde edilmiştir. Kaolin kilinin dane çapı dağılımı ve indeks özellikleri sırası ile Şekil 3.1 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1. Kaolin kilinin dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge 3.3 Kaolin kilinin indeks özellikleri

Özellikler	Kaolin	Standartlar
Likit Limit, w_L (%)	56	ASTM D4318-10
Plastik Limit, w_p (%)	30	ASTM D4318-10
Plastisite İndeksi, I_p (%)	26	ASTM D4318-10
Özgül Ağırlık	2.62	ASTM D854- 14
Optimum Su İçeriği (%)	30	ASTM D698-07
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (t/m^3)	1.30	ASTM D698-07

Kaolin kilinin kimyasal bileşenleri de XRF yöntemi kullanılarak elde edilmiştir ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.4 Kaolin kilinin kimyasal bileşenleri

Sembol	Konsantrasyon (%)	Mutlak Hata (%)
Na_2O	0.11	0.0
MgO	0.28	0.28
Al_2O_3	54.13	0.07
SiO_2	43.62	0.05
P_2O_5	0.11	0.0013
SO_3	0.09	0.00051
Fe_2O_3	0.53	0.0039

3.3. Kullanılan Çimentoların Özellikleri

Ön çalışma kapsamında, sülfat içeren zeminlerin çimento stabilizasyonunda sülfata dayanıklı çimento kullanımının avantajlarını belirlemek amacıyla normal portland ve sülfata dayanıklı olmak üzere iki tip çimento kullanılmıştır. Örneklerin hazırlanmasında kullanılan normal portland çimentosunun ve sülfata dayanıklı çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Normal Portland çimentosunun ile sülfata dayanıklı çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşen	Normal Portland Çimentosu CEM I 42.5 R	Sülfata Dayanıklı Çimento CEM I 42.5 R- SR
SiO ₂ (%)	20.69	19.66
Al ₂ O ₃ (%)	6.24	4.03
Fe ₂ O ₃ (%)	2.48	4.53
CaO (%)	61.78	63.05
MgO (%)	1.90	2.10
SO ₃ (%)	2.99	2.76
Na ₂ O (%)	0.25	0.12
K ₂ O (%)	0.98	0.54
Cl- (%)	0.0084	0.0071
Çözünmeyen	1.89	0.30
Kızdırma Kaybı	2.19	3.22
Özgül Ağırlık	-	3.13

Ön çalışma kapsamında, montmorillonit kili çimento ile stabilize edilerek, farklı oranlarda çimento ile stabilize edilmiş kilin dayanım ve geçirimsizlik özelliklerinin belirlenebilmesi amacı ile serbest basınç ve klor-iyon geçirgenliği deneyleri yapılmıştır.

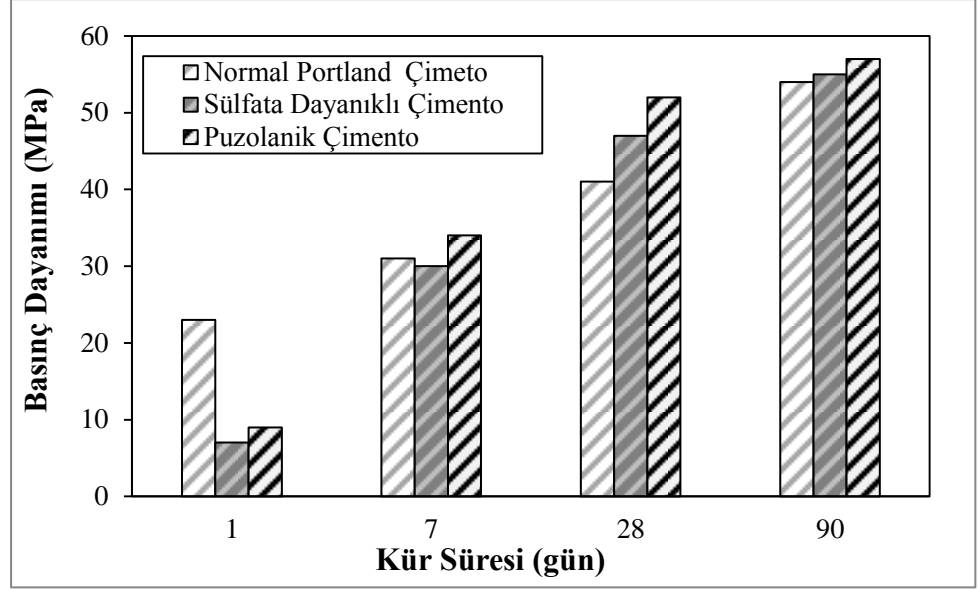
Ön çalışma neticesinde elde edilen bulgular neticesinde tez çalışmasında, stabilizasyon için seçilen çimento tipinin sülfat etkisi altındaki performansını inceleyebilme amacı ile normal portland, sülfata dayanıklı ve puzolanik olmak

üzere üç farklı çimento tipi kullanılmıştır. Çimento tiplerinin kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6 Normal Portland çimentosunun, sülfata dayanıklı çimentonun ve puzolanik çimentonun kimyasal özellikleri

Bileşen	Normal Portland Çimentosu	Sülfata Dayanıklı Çimento	Puzolanik Çimento
SiO ₂	18.27	17.6	25.02
Al ₂ O ₃	4.12	3.06	7.57
Fe ₂ O ₃	3.49	4.65	3.69
CaO	63.32	64.24	53.27
MgO	2.43	2.61	1.33
Na ₂ O	0.36	0.43	0.72
K ₂ O	0.92	0.39	0.96
SO ₃	3.04	2.56	3.37
Kızdırma Kaybı	3.9	3.56	3.56
Özgül Yüzey-Blaine (cm ² /g)	3120	3480	3700
Özgül Ağırlık –Yoğunluk (kg/m ³)	3.12	3.12	2.91

Üç tip çimentonun harç dayanımlarını belirlemek amacı ile ASTM C109 standardına uygun olarak harç karışımları hazırlanmıştır. Karışımı hazırlamak için 500 g çimento, 242.5 g su ve 1375 g standart kum kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar, 50x50x50 mm'lik küp örnekler elde edebilmek amacı ile kalıplara yerleştirilmiştir ve belirlenen kür süresi boyunca kür odasında bekletilmiştir. Örneklerin, 1, 7, 28 ve 90 günlük dayanımları belirlenmiştir. Şekil 3.2'de çimento harçlarının farklı kür sürelerindeki dayanımları verilmiştir.



Şekil 3.2. Üç farklı tip çimento içeren harçların basınç dayanımları

Puzolanik çimentonun genellikle ileri dönemlerde gerçekleşen puzolanik reaksiyonlardan dolayı normal portland çimentosuna göre daha geç dayanım kazandığı bilinmektedir. Ancak, Çizelge 3.6'da da görüldüğü üzere puzolanik çimentonun Blaine inceliği portland çimentosuna göre daha yüksek olduğundan 7 günden sonra puzolanik çimentonun normal portland çimentoya göre daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür. Normal portland çimentosunun 90 günlük dayanımı 7 günlük dayanımının 2.3 katıdır. Puzolanik çimentoda ise, 90 günde elde edilen dayanım 7 güne göre 6.3 kat artmaktadır. Sülfata dayanıklı çimento içeren harçlarda ise 90 günde elde edilen dayanım 7 günlük dayanımının 7.9 katı olmaktadır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, puzolanik ve sülfata dayanıklı çimentonun 7 gün sonrasında normal portland çimentosuna göre dayanım kazanma hızlarının daha fazla olduğu görülmektedir.

3.4. Ön Çalışma Kapsamında Örneklerin Hazırlanması

Serbest basınç ve klor-iyon geçirgenlik deneyi örnekleri optimum su içeriğinde standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Örnekleri hazırlamak için öncelikle optimum su içeriğine eşit miktardaki su, belirlenen miktardaki çimento ile karıştırılarak sulu çimento karışımı elde edilmiştir. Daha sonra bu karışım kuru kile üniform bir renk elde edilene kadar karıştırılmıştır. Elde edilen kil-çimento karışımı standart proktor enerjisi altında 100% rölatif kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Priz durumunu engellemek için örnekleri hazırlama sürecinin 1 saatten az olmasına dikkat edilmiştir. Serbest basınç deneyi

örnekleri, 15.2 cm çapındaki büyük kalıpta standart enerji ile sıkıştırılan çimento stabilize kile 50x100 mm'lik örnek çıkarıcıların çakılmasıyla elde edilmiştir. Klor-iyon geçirgenliği deneyi örnekleri ise, 100 mm çapa ve 200 mm yüksekliğe sahip kalıp yardımı ile hazırlanmıştır. Standart proktor enerjisine ile sıkıştırılan çimento stabilize kil örnek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 eşit parçaya bölünmüş ve bu sayede 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde örnekler oluşturulmuştur. Hazırlanan tüm örnekler sahip oldukları nemi kaybetmemeleri için streç film ile sarılarak kür odasına yerleştirilmiştir.

Bu aşamada kritik olan bir nokta ise, örneklerin belirli bir dayanım değerine sahip olması amacı ile kür odasında ne kadar süre bekletileceğidir. Öncelikle kür odasında 1 hafta bekletilen örnekler daha sonra deney programında belirtilen süre boyunca sülfat çözeltilerinin içerisine bırakılmışlardır. Bu süreç içerisinde örnekler gözlemlendiğinde, 40 adet serbest basınç deneyi örneğinin çözelti içerisinde dağıldığı görülmüştür. Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b' de 7 gün kür odasında bekletilen örneklerin çözelti içerisinde dağılmış durumları görülmektedir. Bu durum, örneklerin 7 gün kür süresi içerisinde kazandıkları dayanımın çözelti içerisinde örneklerin bütünlüğünün sağlanabilmesi için yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 3.3. a) 7 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağıtılmış serbest basınç deneyi örnekleri
b) 7 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağılmış geçirimsizlik deneyi örnekleri

Bu nedenle, örneklerin çözelti içerisinde dağılmalarını engellemek amacı ile sülfat çözeltilisine daldırılmadan önce kür odasında bekleme süresinin arttırılmasına karar verilmiştir. Dağılan örneklerin ardından hazırlanan yeni

örnekler 21 gün süre ile kür odasında bekletilmiş ve daha sonra da sülfat çözeltisine bırakılmışlardır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. 21 gün kür odasında bekletilmiş ve çözeltide dağılmamış örnekler

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te görüldüğü üzere örneklerin sülfat çözeltileri içerisinde karışmalarını engellemek amacı ile farklı renklerdeki lastikler kullanılarak çimento içeriğine, kür süresine ve çimento tipine bağlı olarak bir kodlama yapılmıştır. Belirlenen süre içerisinde çözeltide bekletilen örnekler üzerinde ASTM D 2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Örneklerin geçirgenliğini ölçmek amacı ile de ASTM C 1202 standardına uygun olarak klor-iyon geçirgenliği deneyi yapılmıştır.

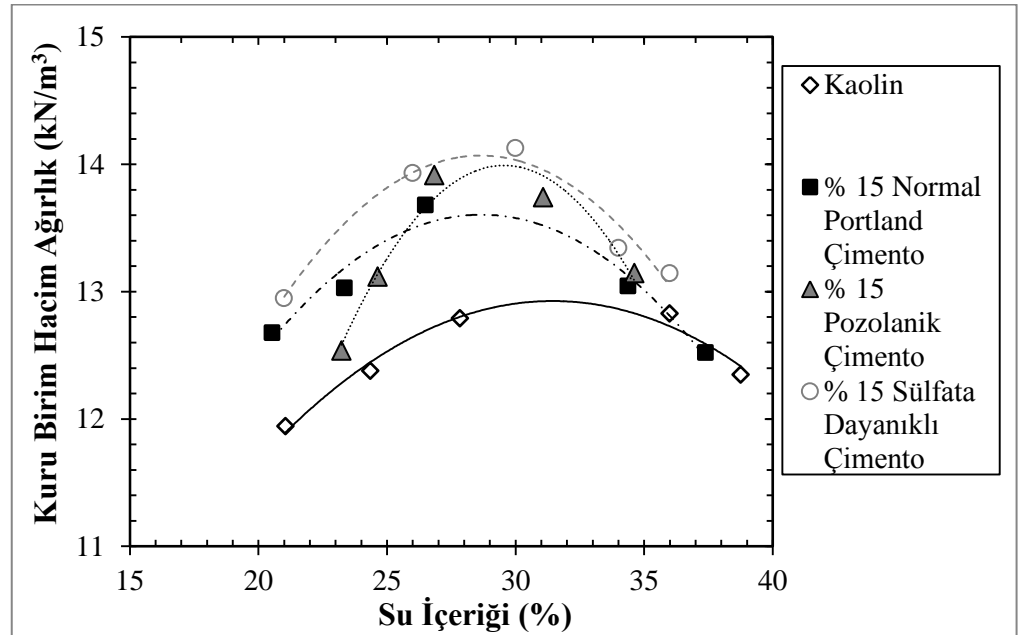
Ön çalışmada, bu metot ile hazırlanan örnekler 21 gün süre ile kür odasında bekletildikten sonra çözelti içerisinde bekletilmiştir. Ancak, kontrol grubu olarak belirlenen ve su içerisinde bekletilen örneklerin de zarar gördüğü ve dayanımlarında ciddi ölçüde kayıplar meydana geldiği belirlenmiştir. Suda bekletilen kontrol grubunun dayanım kaybının engellenebilmesi amacıyla sülfatın ortama girişinin karakterizasyonu için daha değişik bir model düşünülmüştür: Eğer ki zemin, sülfatlı suya doymun değil, ancak sülfatlı su zeminin içinde mevcutsa, bir başka deyişle doymunluk derecesi % 100'den küçük iken, nemli zeminin optimum su içeriğine getirilerek, standart bir enerjinin altında sıkıştırılması sonrasında sülfatın etkisinin değerlendirilmesi amacı ile, farklı bir yöntem öngörülmüştür. Tez kapsamında düşünülen sülfat içeriklerinde, sülfat tuzunun karışım suyunun içeriğine karıştırılması ile, sülfat etkisi ve olası etrenjit oluşumu, zemin örneğin içerisinden başlatılmıştır. Bu yöntemin uygulanması ile beklenen sonuçlar elde edilmiştir. Örneklerin bütünlüğü bozulmamış, aynı

zamanda sülfat etkisi ile örneklerin klor-iyon geçirgenliği miktarlarında artış, serbest basınç dayanımlarında azalım gözlenmiştir.

3.5. Örneklerin Hazırlanması

Deneysel çalışma için hazırlanacak örnekler için, ön çalışma kapsamında da belirlenen eksiklikler giderilerek bir örnek hazırlama metodu geliştirilmiştir. İlk olarak farklı çimento tiplerinde olmak üzere % 15 çimento içeren örneklerin optimum su içerikleri belirlenmiştir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**).

Farklı tiplerde çimento içeren örneklerin, optimum su içeriklerini belirlemek amacı ile kullanılacak örnek hazırlama metodu göz önüne alınarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. İlk olarak, 3000 g. kuru kaolin kili kilin kuru ağırlığınca % 15'i olan 450 g. çimento ile kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra, %20 ve 40 aralığında değişen oranlarda olmak üzere 5 farklı su içeriğinde çimento-kil karışımı hazırlanmıştır. Elde edilen karışımlar küçük kalıpta standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmış ve o su içeriğindeki kuru birim hacim ağırlık elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Farklı tipte olmak üzere % 15 çimento içeren örneklerin Standart Proktor eğrileri

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, çimento içeriği ile beraber kaolin kilinin kuru birim hacim ağırlığı bir miktar değişmiş buna karşın optimum su içeriklerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Farklı çimento tiplerinde dahi

optimum su içeriğinde belirgin bir artış gözlemlenmediğinden dolayı optimum su içeriği yaklaşık olarak (%) 30 olarak kabul edilmiştir. Şişme deneyleri için hazırlanan örnekler dışında, örnekler optimum su içeriğinin +%2'si olacak şekilde yani % 32 su içeriğinde hazırlanmıştır. Şişme deneyi için hazırlanan örnekler ise standart Proktor enerjisinde ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır.

3.5.1. Serbest basınç deneyi örneklerinin hazırlanması

Öncelikle laboratuvara getirilen kaolin kili ve deney programında belirlenen miktardaki çimento homojen bir kuru çimento-kil karışımı elde etmek için mikserde karıştırılmıştır. Optimum su içeriğinin + % 2'si değerinde hesaplanan su miktarı mikser çalışır durumda iken kil-çimento karışımına yavaş yavaş eklenmiştir. Sülfat içeren örneklerde ise, eklenecek su % 1 konsantrasyonunda sodyum veya magnezyum sülfat çözeltisi olarak hazırlanmıştır. Çözeltiler, % 1 konsantrasyon için hesaplanan magnezyum sülfat tuzlarının yüksek devirli karıştırıcıda çözdürülmesi ile hazırlanmıştır. Mikserde karıştırma işlemi bittikten sonra, çimento-kil karışımı tekrar elle yoğurulmuştur. Serbest basınç deney örneklerinin boyutları 50x100 mm olarak seçilmiştir. Dolayısı ile, her bir sıkıştırma işleminden daha fazla örnek elde edebilmek amacıyla çimento-kil karışımı büyük kalıpta standart proktor enerjisinde sıkıştırılmıştır. Yapılan enerji hesabı sonucu çimento-kil karışımının 5 tabakada ve 33 darbe ile sıkıştırılmasına karar verilmiştir. Büyük kalıpta sıkıştırılan çimento-kil karışımından 50x100 mm'lik örnek alıcılar yardımı ile 5'er adet örnek alınmıştır. İsimlendirme işlemi yapıldıktan sonra örneklerin nemini kaybetmemesi için örnekler streç film ile sarılmış ve belirlenen deney gününe kadar 20 ± 2 °C sıcaklığındaki $95 \pm 5\%$ bağıl neme sahip kür odasında bekletilmiştir. Şekil 3.6'da hazırlanan serbest basınç deneyi örnekleri görülmektedir. Kür süresini tamamlayan örnekler üç farklı noktadan boy ve çap değerleri ölçüldükten sonra yükleme hızı 1.41 mm/s olacak şekilde ASTM 2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneye, % 20 aksenal deformasyona ulaşılan kadar devam edilmiştir.



Şekil 3.6. Serbest basınç deneyi örnekleri

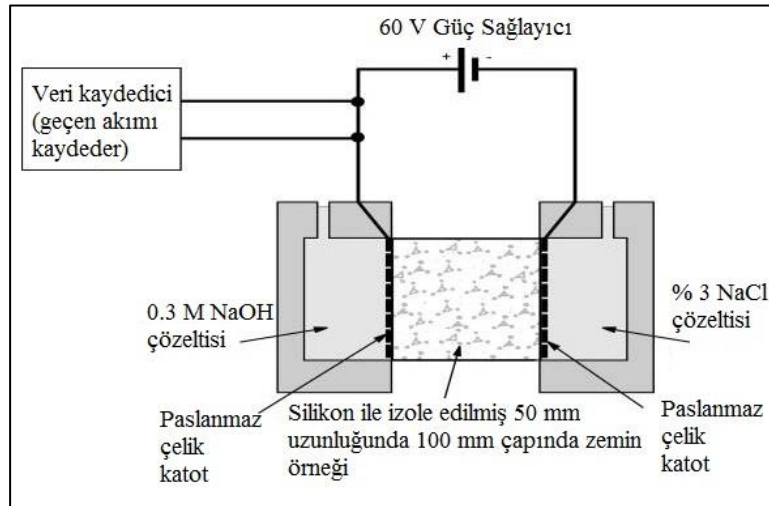
3.5.2. Klor-iyon deneyi örneklerinin hazırlanması

Klor-iyon geçirimsizlik deneyleri örnekleri 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır. Mikserde optimum su içeriğinin + % 2 değerindeki su miktarı ile karıştırıldıktan sonra elle yoğurulan çimento-kil karışımı standart proktor sıklığında sıkıştırılmış daha sonra yüzeyleri düzeltilmiştir. Kalıptan çıkarılan örnekler isimlendirildikten sonra streç film ile sarılmıştır. Belirlenen deney gününe kadar sıcaklığı 20 ± 2 °C olan ve $95 \pm 5\%$ bağıl neme sahip odada bekletilmiştir. Şekil 3.7’de klor-iyon deneyi örnekleri kalıptan çıkarılırken görülmektedir. Klor-iyon geçirimsizlik deneyi ASTM C1202 standardına uygun olarak yapılmıştır. Klor-iyon geçirgenliği deney cihazının deney düzeneği şeması Şekil 3.7’de görülmektedir. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, klor-iyon geçirimsizlik cihazının başlıklarına doldurmak üzere ASTM standartlarına uygun olarak % 0.3 M NaOH ve % 3 NaCl çözeltileri hazırlanmıştır. Örnekler deforme olmamasına dikkat edilerek, cihazın başlıkları arasına yerleştirilmiştir. Başlıklar arasına yerleştirilen örnekler, izolasyon amacıyla şeffaf silikon ile kaplanarak yaklaşık 1 saat süresince sertleşmesi beklenmiş ve bu sayede dış hava ile teması engellenmiştir. Hazırlanan çözeltiler başlıklar tamamen dolacak şekilde huni yardımı ile dökülmüştür. Örnekler içerisinden geçen akım miktarı Coloumb cinsinden ölçülmüştür. Standartlara göre klor-iyon geçirimsizlik deneyi beton örneklerinin geçirimsizliklerinin ölçülmesi amacı ile tasarlanmıştır ve standartlara göre 6 saat süre sonunda örnek üzerinden geçen akım miktarı ölçülmektedir. Bu

duruma karşın, kil ile hazırlanan örnekler çok daha geçirgen olduğundan dolayı beton örneklerle kıyasla çok daha fazla akım geçmekte ve cihazın ısınmasına yol açmaktadır. Kullanılan klor-iyon geçirimsizlik cihazının sıcaklığı 70 °C'yi aştığında geçirimsizlik cihazı kapanmaktadır. Bu nedenle, montmorillonit türü kil ile hazırlanan örneklerde yarım saat sonundaki değerler, kaolin türü kil ile hazırlanan örneklerde ise 1 saat sonunda elde edilen değerler kaydedilmiştir. Şekil 3.8'de klor-iyon geçirgenliği deney cihazının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.7. Klor-iyon geçirgenliği deneyi örnekleri



Şekil 3.8. ASTM C1202 Klor-iyon geçirgenliği deney cihazı

3.5.3. Donma- çözülme deneyi örneklerinin hazırlanması

Serbest basınç deneyi örnekleri ile aynı yöntem kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. Kür süresini tamamlayan örnekler, laboratuvarında bulunan programlanabilir hızlı donma çözülme cihazı ile donma çözülmeye tabi tutulmuştur. Deney cihazında her donma çözülme evresinde örnekleri sulamak için bir sistem bulunmaktadır. Örneklerin su içeriklerinin değişmemesi veya su tazyiki ile örneklerin dağılmaması amacıyla örnekler, önce streç film ile sarılarak kapaklı plastik su geçirmez kaplar içerisinde yatay pozisyonda konumlandırılmıştır. Daha sonra, örnekler 6 ve 12 adet donma çözülme çevrimine maruz bırakılmışlardır. Deneyde donma sıcaklığı -18 ± 2 °C aralığında ve çözülme sıcaklığı ise 5 ± 2 °C aralığındadır. Donma süresi (maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varsa süresi) 180 dakika, minimum sıcaklık maksimum sıcaklığa varma süresi 50 dakika olarak ayarlanmıştır. Donma - çözülme döngüsünü tamamlayan örnekler, dayanımlarındaki değişimin incelenmesi amacıyla serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır.

Çizelge 3.7 de donma-çözülme deneyleri, Çizelge 3.8'de de serbest basınç dayanımı ve klor-iyon geçirimsizlik deneyleri için örnek tablosu verilmiştir.

Çizelge 3.7 Donma-çözülme deneyleri örnek listesi

Çimento Tipi	Sülfat Tipi	Çimento İçeriği (%)	Kür Süresi	Donma Çözülme Çevrim Sayısı
Normal Portland Çimentosu	Su	0	7	6
		5		12
		10	28	6
		15		12
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	7	6
		5		12
		10	28	6
		15		12
Sülfata Dayanıklı Çimento	Su	0	7	6
		5		12
		10	28	6
		15		12
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	7	6
		5		12
		10	28	6
		15		12

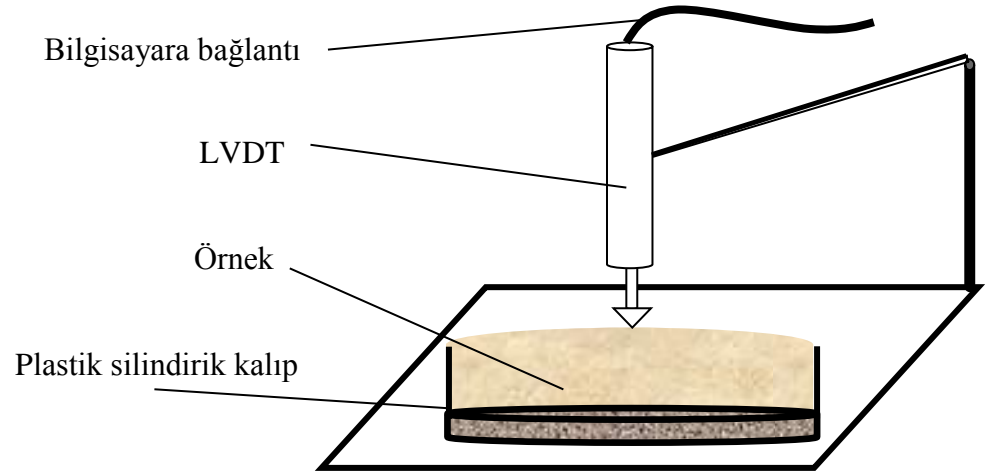
Çizelge 3.8 Serbest basınç dayanımı, klor-iyon geçiririllik deneyleri örnek listesi

Çimento Tipi	Sülfat Tipi	Çimento İçeriği (%)	Kür Süresi
Normal Portland Çimentosu	Su	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
Puzolanik Çimento	Su	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
Sülfata Dayanıklı Çimento	Su	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	1
		5	7
		10	28
		15	90

3.5.4. Serbest şişme deneyi örneklerinin hazırlanması

Çimento stabilize zeminlerin şişme özelliklerinde çimento miktarının ve tipinin etkisinin incelenebilmesi amacı ile 50x25 mm boyutlarında örnekler hazırlanmıştır. Deney programında belirlenen çimento miktarı ile kaolin öncelikle kuru olarak karıştırılmış daha sonra örnekler optimum su içeriğinde standart proktor enerjisinde sıkıştırılmıştır. Rijit kalıp içerisine yerleştirilen örneklerin ilk ölçüm değerleri alınarak referans yükseklikleri belirlenmiştir. Daha sonra örnekler % 1 konsantrasyonunda olmak üzere magnezyum sülfat, sodyum sülfat çözeltilerinde ve suda bekletilmiştir. Örneklerin 2, 4, 6 ve 8 gün sonraki ölçüm değerleri alınarak şişme miktarları Denklem 3.1 yardımı ile ASTM 4546-14 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.9'da görülmektedir.

$$S = \frac{[(\text{Son şişme değeri}) - (\text{Referans değeri})]}{\text{Referans değeri}} \times 100 \quad (3.1)$$



Şekil 3.9. Bir boyutlu serbest şişmenin belirlenebilmesi için gerekli düzenek (Örneğin çapı ve yüksekliği sırası ile 50 ve 25 mm.'dir)

Çizelge 3.9'da serbest şişme deneyleri için deney çalışma programı verilmiştir.

Çizelge 3.9 Serbest şişme deneyleri için örnek hazırlama listesi

Çimento Tipi	Sülfat Tipi	Çimento İçeriği (%)	Ölçüm süresi
Normal Portland Çimentosu	Su	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
Puzolanik Çimento	Su	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
Sülfata Dayanıklı Çimento	Su	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Magnezyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8
	Sodyum Sülfat Çözeltisi	0	2
		5	4
		10	6
		15	8

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Ön Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar

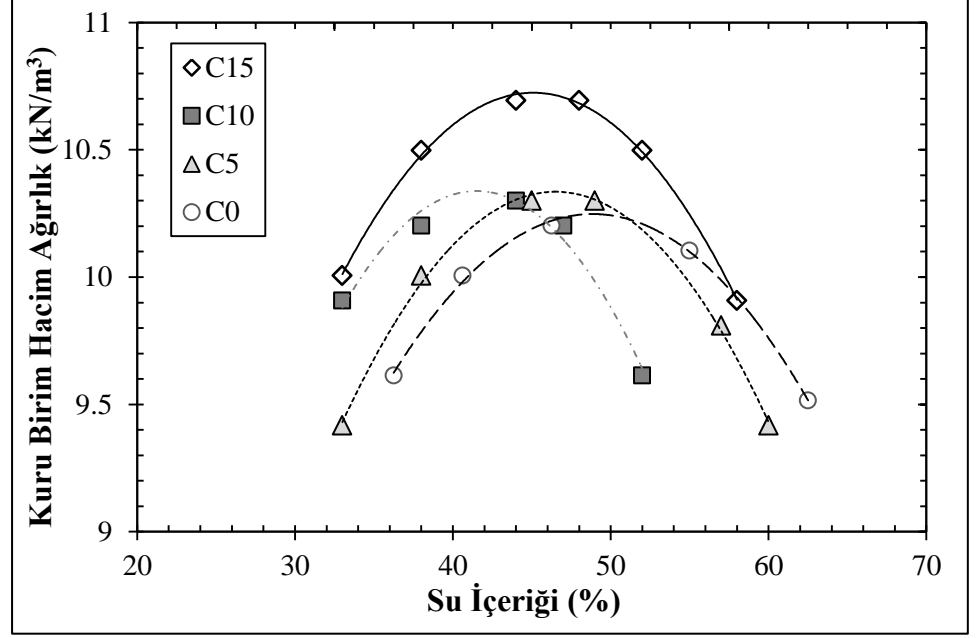
Çimento stabilizasyonu, montmorillonit kiline kilin kuru ağırlığının %5, 10 ve 15 oranında çimentonun eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ortamda bulunan sülfatın, çimento stabilize zeminlerin dayanım ve geçirimsizlik özelliklerine etkisi sodyum ve magnezyum sülfat olmak üzere iki tip sülfat tuzunun farklı konsantrasyonlarda (% 0.5 ve %1) kullanılması ile belirlenmiştir. Son olarak, kür süresinin yukarıda belirtilen özellikler üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi için üç farklı kür süresi (1, 7 ve 28 gün) seçilmiştir. Çimento içeriğinin montmorillonit kilinin sıkışma özelliklerine etkisi farklı oranlarda çimento içeren kil-çimento karışımlarının ASTM D698 standartlarına uygun Standart Proktor deneyleri yapılarak tespit edilmiştir. Örneklerin birbiri ile karışmasını engellemek amacı C, N-SD, Na-Mg indisleri kullanılarak etiketlenmiştir. Burada, C çimento içeriğini, N ve SD sırasıyla normal ve sülfata dayanıklı çimento tipini, Na (sodyum) ve Mg (magnezyum) sülfat tiplerini sembolize etmektedir. W harfi ise, kontrol grubu olarak hazırlanan ve suda bekletilen örnekleri belirtmektedir. Örnek olarak, C10Mg1.0N7 notasyonu kilin kuru ağırlığınca % 10 oranında normal portland çimento içeren örneğin % 1 konsantrasyonundaki magnezyum sülfat çözeltisinde 7 gün bekletildiğini ifade etmektedir.

Serbest basınç ve klor-iyon geçirgenliği deneylerinden elde edilen sonuçlar sülfat tipi, çimento içeriği, çimento tipi, sülfat konsantrasyonu ve kür süresine bağlı olarak değerlendirilmiştir.

4.1.1. Çimento stabilizasyonunun kompaksiyon özellikleri üzerine etkisi

Montmorillonit kilinin farklı çimento içeriklerindeki kompaksiyon eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir. Kompaksiyon eğrileri sıkıştırılan örneklerin kuru birim hacim ağırlıklarına karşılık gelen su içeriklerinin grafiksel olarak ifade edilmesi ile elde edilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi çimento içermeyen ve % 5, 10,15 oranında çimento içeren örneklerin optimum su içerikleri sırası ile % 45, 47, 45 ve 47 olarak belirlenmiştir. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi, çimento içeriğinin artışı çimento-kil karışımlarının optimum su içeriğinde belirgin bir değişime neden olmamıştır. Aynı zamanda, çimento içeriğinin artışı çimento-kil karışımlarının

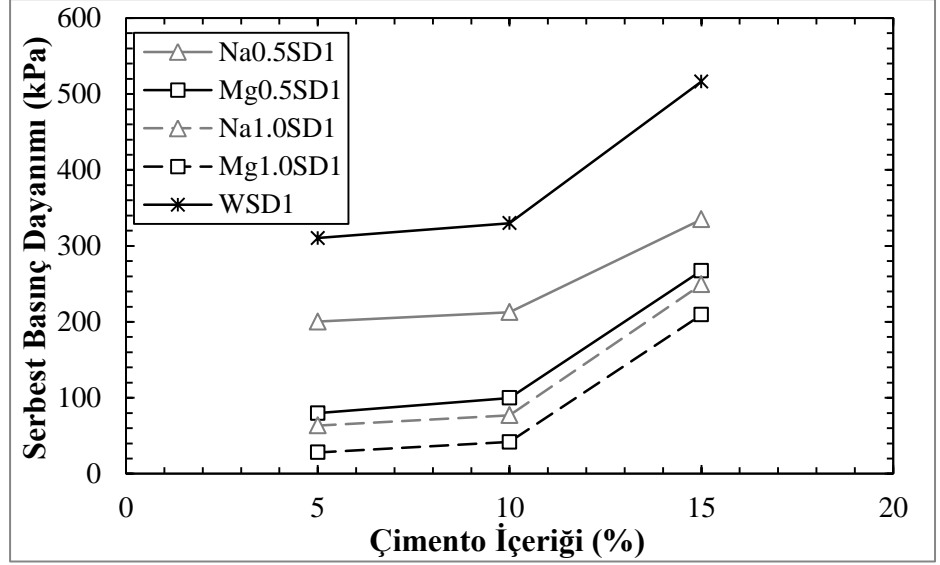
maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında da önemli değişikliklere yol açmadığı da gözlemlenmiştir. Çimento içermeyen ve % 5, 10, 15 oranında çimento içeren örneklerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları sırası ile 10.2, 10.3, 10.3 ve 10.7 kN/m³ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1. Çimento stabilize montmorillonit kilinin sıkışma eğrileri

4.1.2. Çimento içeriğinin dayanım özelliklerine etkisi

Daha önce de belirtildiği üzere, farklı koşullardaki örneklerin dayanım özellikleri serbest basınç deneyleri ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan; yapılan analizlerden çimento içeriğinin, çimento tipinin, sülfat çözeltisinin etkileri ve gerilme deformasyon ilişkileri incelenmiştir. Hazırlanan örnekler, serbest basınç deneyinde deformasyon kontrollü olarak 1 mm/sn'lik hız ile yüklenmiştir. Şekil 4.2'de 1 gün süresince çeşitli sülfat çözeltileri içerisinde bekletilen ve %5 , 10 ve 15 oranında sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımları çimento içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir.



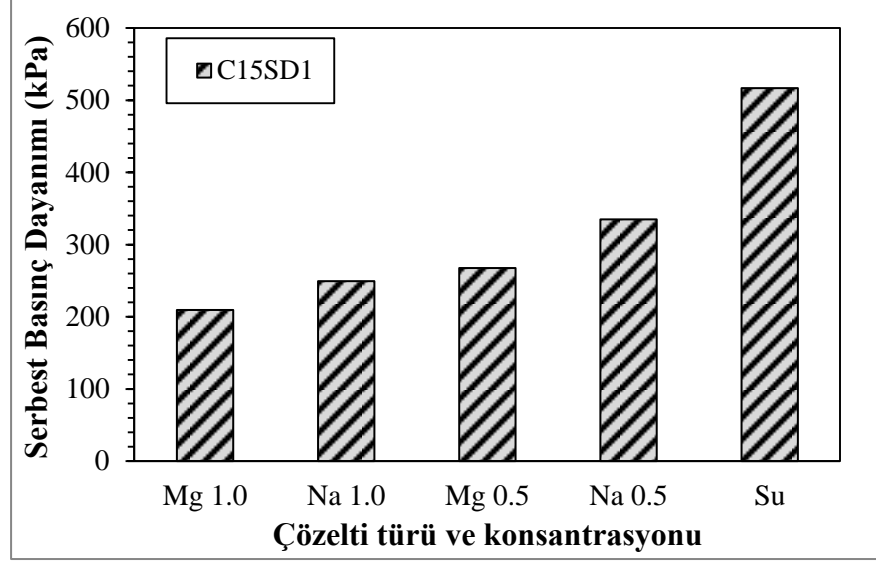
Şekil 4.2. Farklı çözeltilerde bekletilen örneklerin çimento içeriklerine bağlı olarak serbest basınç dayanımlarındaki değişim

Şekilde görüldüğü üzere, % 5 ve 10 çimento içeren örnekler göz önüne alındığında % 15 çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Daha önce açıklandığı gibi, çimento stabilize zeminlerdeki dayanım artışı çimento ve zemin arasında meydana gelen reaksiyonlar ve hidrasyon ile ilişkilidir. Ek olarak, iki tip çözeltilerde de çözelti konsantrasyonunun artışı örneklerin dayanımlarının azalmasına neden olmaktadır.

4.1.3. Sülfat çözeltilerinin dayanım özelliklerine etkisi

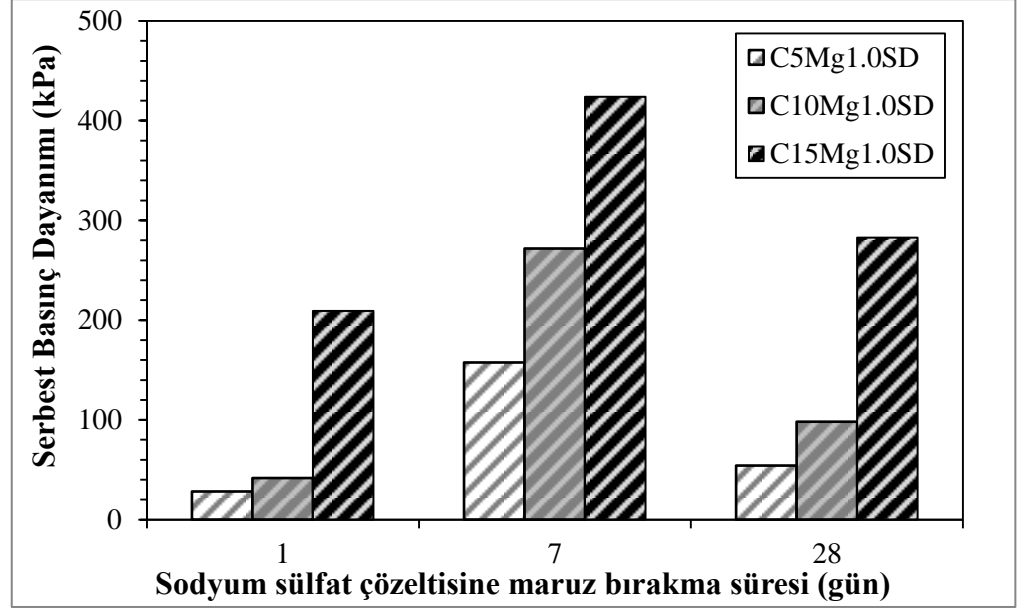
Sülfat tuzu konsantrasyonu ve türü ayrıca incelenmiştir. Şekil 4.3'te ağırlıkça % 15 oranında sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin farklı konsantrasyonlarda ve tiplerde bekletildikten sonra elde edilen serbest basınç dayanımları verilmiştir. Anlaşıldığı üzere en yüksek serbest basınç dayanımı su içerisinde bekletilen örnekte elde edilmiştir. Bununla birlikte, en düşük serbest basınç dayanımı ise % 1 konsantrasyonundaki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekte gözlemlenmiştir. Ayrıca, aynı konsantrasyon seviyesindeki çözeltilerde bekletilen örnekler kıyaslandığında magnezyum sülfat çözeltisinin daha fazla dayanım kaybına neden olduğu görülmektedir. Magnezyum sülfat tuzunun, sodyum sülfat tuzundan daha saldırgan olduğu ve örneklerde daha fazla hasara yol açtığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu etkinin magnezyum sülfat çözeltisinde oluşan genleşme ve çatlak oluşumundan ayrıca hidrate kalsiyum silikat ve çimentonun bağlayıcı özelliğinin kaybolması sonucu gerçekleştiği söylenebilir. Öte yandan, su içerisinde bekletilen örneklerin serbest basınç

dayanımları çözeltilerde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımından en az 2 kat daha fazla olmaktadır. Beklenildiği üzere, sülfat konsantrasyonunun artışı sülfat kaynaklı zararları arttırmaktadır.



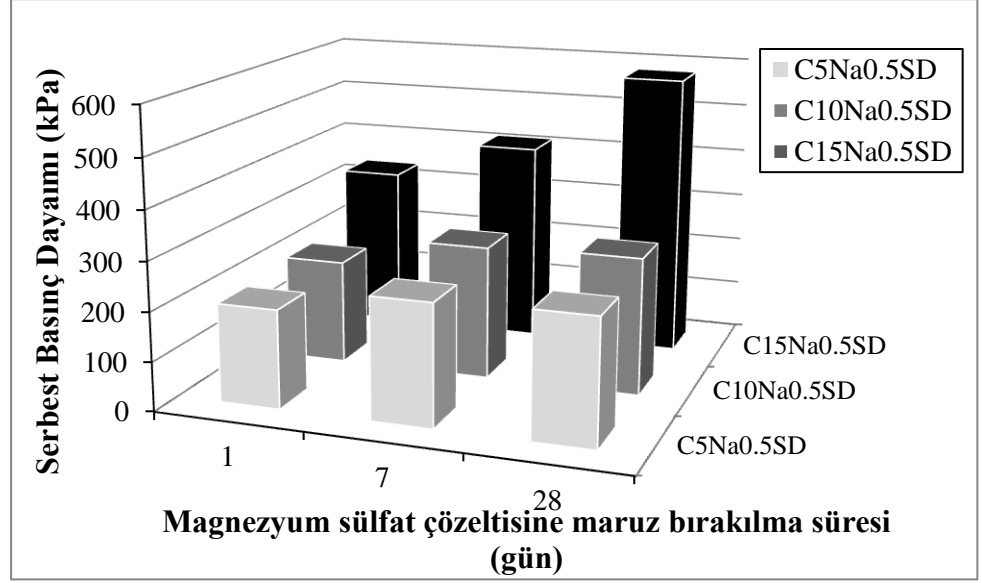
Şekil 4.3. Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin 1 gün süre ile farklı çözeltilerde bekletildikten sonra elde edilen serbest basınç dayanımları

%1 konsantrasyonundaki magnezyum sülfat çözeltilerinde farklı sürelerde bekletilen ve % 5,10, 15 oranlarında sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, en yüksek serbest basınç dayanımı 7 gün süre ile sülfat çözeltisinde bekletilen yani sülfat saldırısına maruz bırakılan örneklerde elde edilmiştir. Ancak, 7 gün çözeltilerde bekletileme süresinden sonra örneklerin serbest basınç dayanımlarında azalma eğilimi görülmektedir. Bu durumda iki mekanizma söz konusudur. İlk olarak, dayanımı arttıran kalsiyum silika hidrat jellerinin oluşumuna neden olan çimento hidratasyon reaksiyonları hızla gerçekleşmektedir. Öte yandan, genleşme ve çatlak oluşumu ile dayanımın azalmasına neden olan sülfat saldırısı da ikinci mekanizma olarak ortaya çıkmaktadır. Deney sonuçlarından, ilk 7 gün çözeltilerde bekletilen örneklerde hidratasyon sonucu kazanılan dayanım sülfat saldırısı sonucu oluşan dayanım kaybından daha dominant olmaktadır. 28 gün boyunca sülfat saldırısına maruz bırakılan örneklerde ise, 7 gün çözeltilerde bekletilen örnekler göz önüne alındığında dayanım kaybı belirgin olarak görülmektedir. Sonuç olarak, 28 gün süresince sülfat saldırısında maruz bırakılan örneklerde sülfat saldırısının dayanım kazanma mekanizmasından daha etkin olduğu söylenebilmektedir.



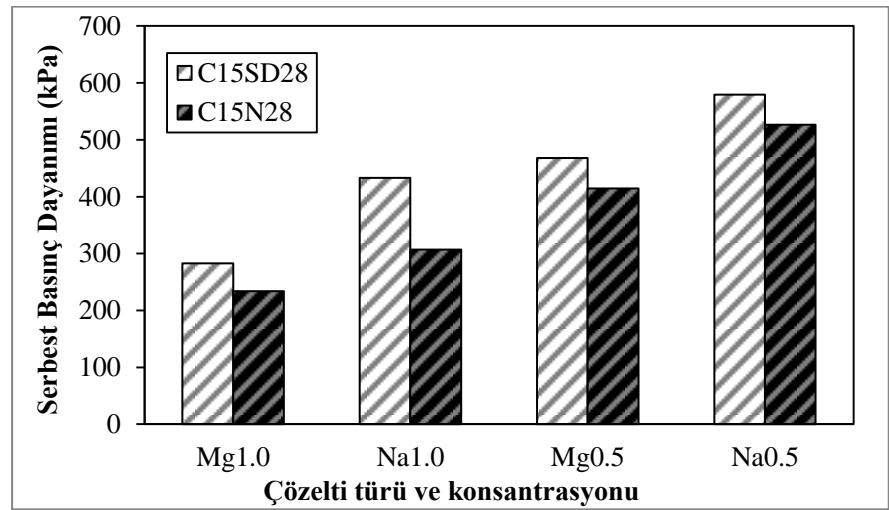
Şekil 4.4. Çözeltide bekletilme süresinin ve çimento içeriğinin magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi

% 0.5 konsantrasyonundaki sodyum sülfat çözeltilerinde farklı sürelerde bekletilen ve % 5,10, 15 oranlarında sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde serbest basınç dayanımları Şekil 4.5'te verilmiştir. % 0.5 konsantrasyonundaki sodyum sülfat çözeltisinde 28 gün süre ile bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımları % 1 magnezyum sülfat içeren çözeltide bekleyen örneklerin aksine bir miktar artış göstermiştir (Şekil 4.4). Bu noktada, % 0.5 konsantrasyonundaki sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen % 15 çimento içeriğindeki örneklerde meydana gelen hidrasyon reaksiyonlarının daha dominant olduğu görülmüştür. Ancak, % 5 ve 10 oranında çimento içeren örneklerde ise 7-28 günlük çözeltide bekletilme süresi içerisinde dayanımda belirgin bir değişim görülmemiştir. Böylece, hidrasyon sonucu dayanım kazanım hızının sülfat saldırısı sonucu gerçekleşen dayanım kaybına eşit olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.5. Çözeltide bekletilme süresinin ve çimento içeriğinin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi

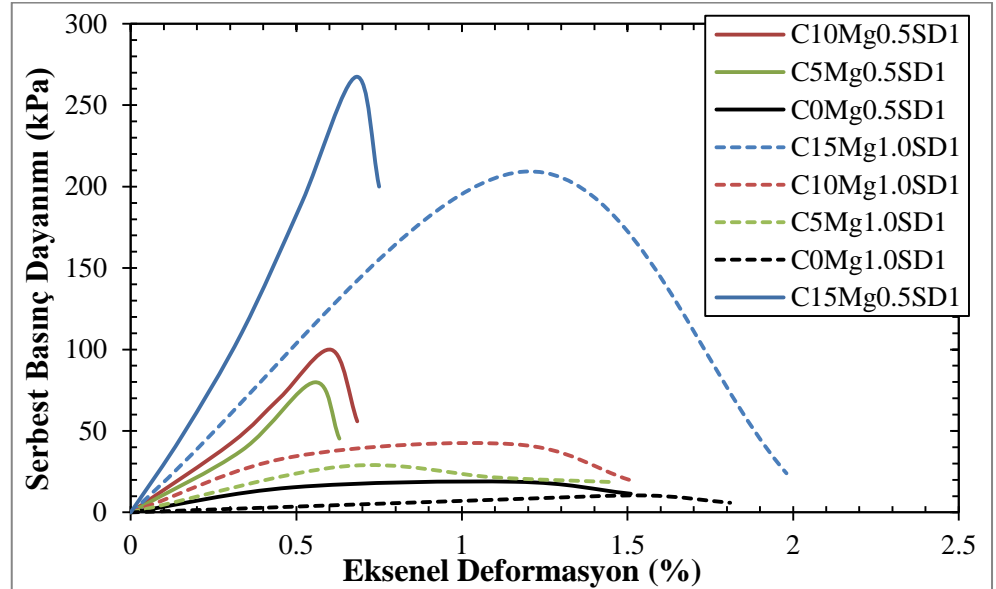
Ön çalışmada, sülfat saldırısı sonucu etrenjit oluşumunun etkisinin incelenmesi amacıyla iki farklı çimento tipi kullanılmıştır. Şekil 4.6'da farklı çözeltilerde bekletilen normal portland ve sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımları görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, sülfata dayanıklı çimento içeren örnekler normal portland çimento içeren örneklere oranla daha iyi performans göstermiştir. Sülfata dayanıklı çimento daha az miktarda C_3A içerdiğinden dolayı genleşmeye ve mikro çatlak oluşumuna neden olan etrenjit oluşumunu azaltmaktadır.



Şekil 4.6. Çimento tipinin ve çözelti konsantrasyonunun % 15 oranında çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi

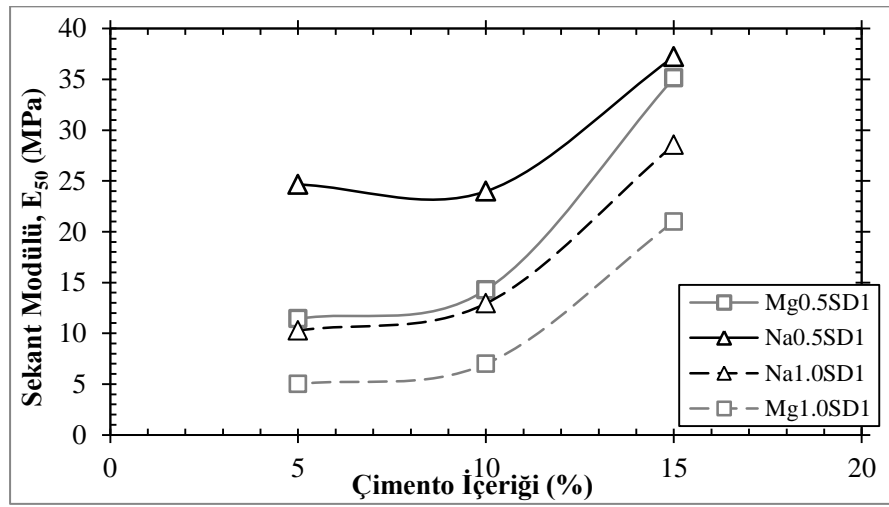
4.1.4. Gerilme-deformasyon ilişkisinin incelenmesi

Farklı çimento içeriği ile stabilize edilmiş kil zeminin gerilme-deformasyon ilişkisi ayrıca incelenmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere, çimento içeriği ve sülfat çözeltisinin konsantrasyonu örneklerin gerilme-deformasyon eğrilerini etkilediği gibi maksimum aksenal gerilmeleri ve aksenal deformasyonları da değiştirmektedir. Şekil 4.7’de farklı konsantrasyonlardaki sülfat çözeltisinde 1 gün süre ile bekletilmiş %5, 10, 15 çimento içeriğindeki örneklerin gerilme-deformasyon eğrileri verilmiştir. Farklı çözeltilerde bekletilmiş saf montmorillonit kil örneği sünek davranış göstermektedir. Ancak, örneklere çimentonun eklenmesi ile birlikte C-S-H jellerinin oluşumu serbest basınç dayanımının artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda, C-S-H jelleri örneklerin kırılma biçimini de etkilemektedir. Daha yüksek çimento içeriklerinde, örnekler daha gevrek davranış göstermektedir. Öte yandan, sülfat saldırısına neden olan sülfat çözeltisi C-S-H jellerinin bağlayıcı özelliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Ek olarak, C-S-H jellerinin bağlayıcı özelliklerinin azalması örneklerin daha sünek davranmasına neden olmaktadır. Bu durumda, gerilme-deformasyon davranışının ve sertlik karakterinin iki durumdan etkilendiği açıkça görülmektedir. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere % 0.5 magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler % 1 magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklere kıyasla daha gevrek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.7. Farklı konsantrasyonlarda bekletilen örneklerin serbest basınç deneyi davranışları

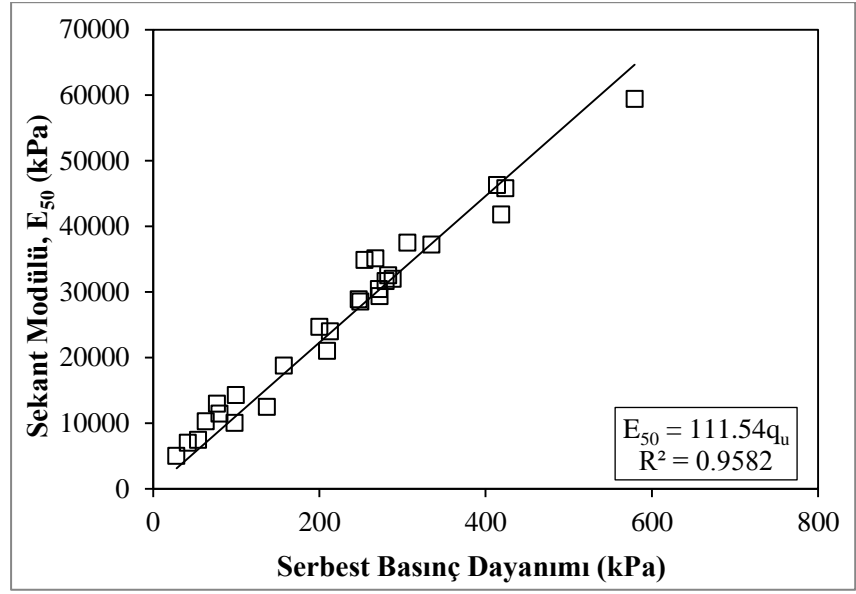
Elastik ve plastik deformasyona karşı olan direncini yansıtan sekant modülü (E_{50}) deformasyon davranışı hakkında bilgi içeren önemli bir parametredir (Wang, et al., 2013). Serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme-deformasyon grafiğinde bulunan serbest basınç dayanımının % 50'sine denk gelen gerilme deformasyon oranı sekant modülü olarak tanımlanır (Lorenzo & Bergado 2006). 1 gün süre ile farklı sülfat çözeltilerinde bekletilen ve % 5, 10, 15 oranlarında çimento içeren örneklerin çimento içeriğine bağlı sekant modülleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, çimento içeriğinin artışına bağlı olarak sekant modülünde artış gözlemlenmiştir. Ön görüldüğü üzere, en büyük sekant modülü % 0.5 konsantrasyonuna sahip sodyum sülfat çözeltilinde elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı konsantrasyonlarda bekletilen örneklerin sekant modülleri

Aynı çözeltilerde bekletilen örneklerin serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında en büyük serbest basınç değeri maksimum sekant modülüne sahip örnekte hesaplanmıştır. Bununla birlikte, serbest basınç ve sekant modülü arasında belirgin bir ilişki vardır. Geçmişte, (Kukko, 2000; Tang, 2000; Zhu, 2005; Wang et al., 2013) kendi çalışmalarında elde ettikleri veriler ile elastisite modülü ve serbest basınç dayanımı arasında çeşitli korelasyonlar elde etmişlerdir. Şekil 4.9'da sülfat etkisine maruz bırakılmış örneklerin serbest basınç dayanımları (q_u) ile sekant modülü arasındaki korelasyon görülmektedir. Serbest basınç dayanımı ve sekant modülü arasında 0.9716 determinasyon katsayısı ile $E_{50} = 111.54q_u$ ilişkisi elde edilmiştir. Bu korelasyon ile sülfat etkisi altındaki çimento stabilize montmorillonit kilinin serbest basınç dayanımı ve elastisite modülleri arasındaki ilişki öngörülebilmektedir. Daha önceki çalışmalarda, (Kukko, 2000), (Tang, 2000), (Wang et al., 2013), (Zhu, 2005) çimento stabilize zeminler için

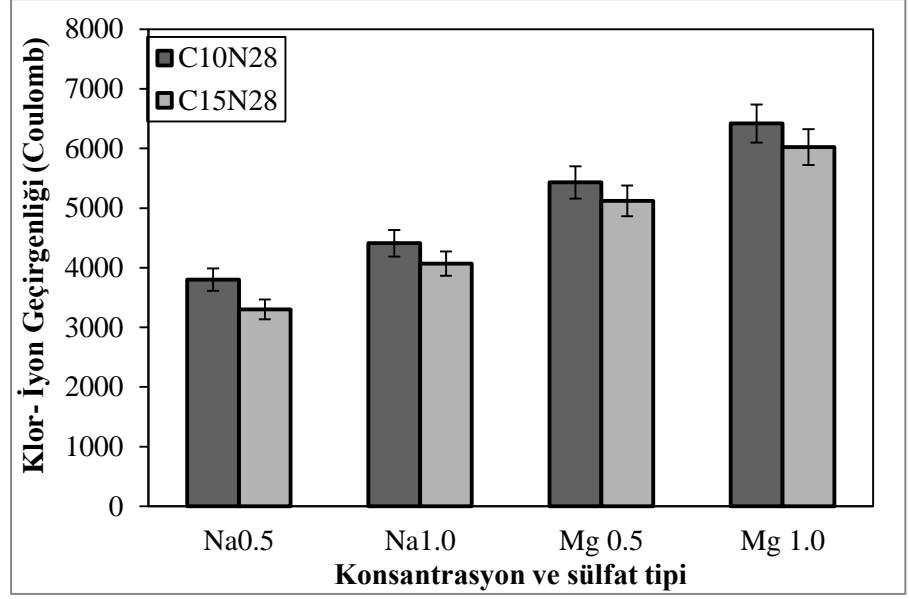
benzer ilişkiler elde etmiştir. Ancak, literatürde sülfat etkisi altındaki çimento stabilize zeminler için herhangi bir korelasyon bulunmamaktadır.



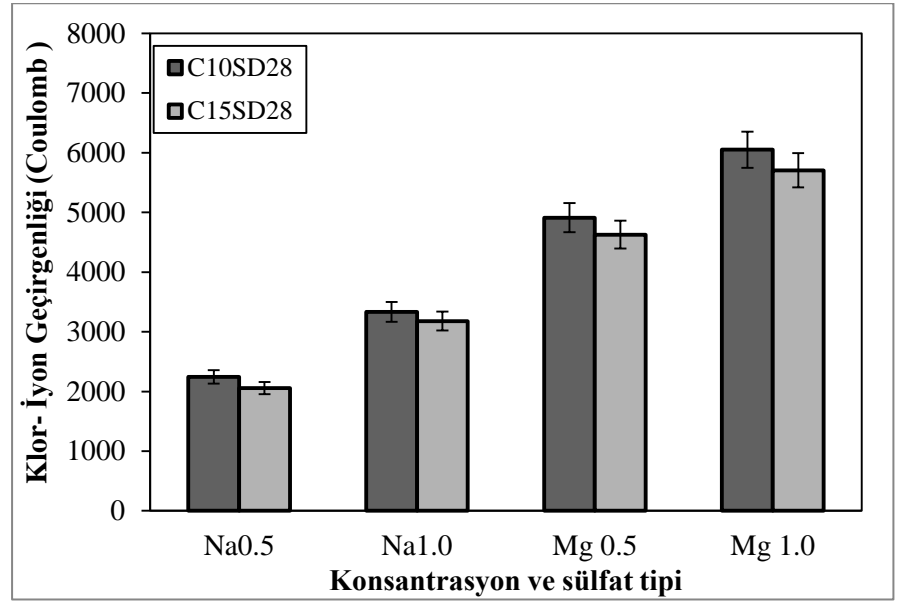
Şekil 4.9. Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki

4.1.5. Klor-iyon geçirgenlik özelliklerinin incelenmesi

Örnekler 28 gün süresince % 0.5 ve % 1 konsantrasyonlarındaki sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilisinde bekletildikten sonra klor-iyon geçirgenliğinin belirleyebilmek amacı ile klor-iyon geçirgenlik deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de klor-iyon geçirimlilik deneyinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.10. 28 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen ve Normal Portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirimlilikleri



Şekil 4.11. 28 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen ve Normal Portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirimlilikleri

Çimento içermeyen ve % 5 oranında normal portland, sülfata dayanıklı çimento içeren örnekler klor-iyon geçirgenlik deneyine tabi tutulmamıştır. Bu nedenle, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de %10 ve % 15 oranında çimento içeren örneklerin klor-iyon geçirgenlik deney sonuçları verilmiştir. Örnek tarafından iletilen akımın çimento içeriğinin artışı ile birlikte arttığı görülmektedir. Sülfata dayanıklı

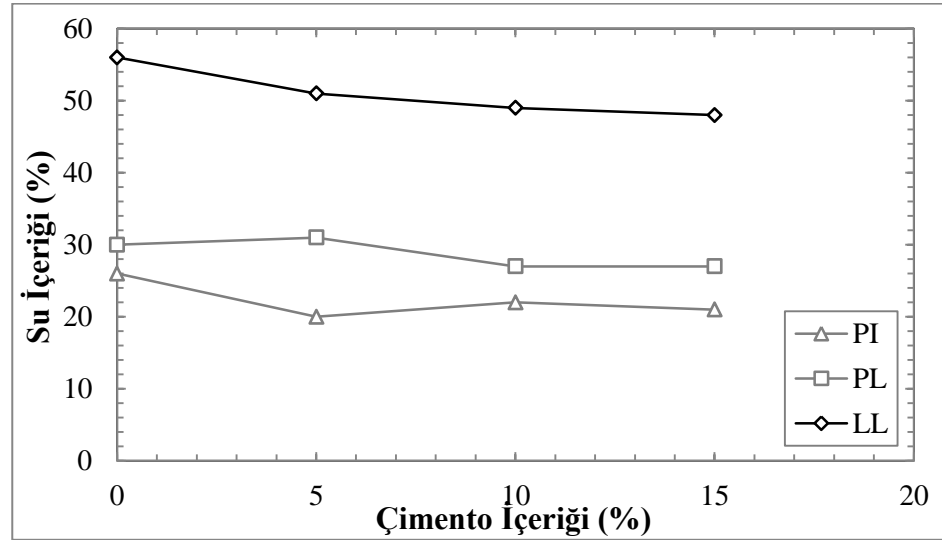
çimento ile normal portland çimentosu içerdikleri C_3A oranına göre nitelendirilmekte ve sülfata dayanıklı çimento normal portland çimentosuna göre daha fazla oranda C_3A içermektedir. Ayrıca, sülfata dayanıklı çimentonun Blaine inceliği Normal Portland çimentosuna oranla daha fazladır. Bu iki pozitif etkinin çakışması neticesinde sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin permeabilite değerlerinin normal portland çimentosu içeren örneklere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.

4.2. Deneysel Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar

Çalışma programında, serbest basınç deneyi, klor-iyon geçirimsizlik deneyi ve donma çözülme deneyleri için her biri en az 3 adet örnekten oluşan 314 adet deney seti hazırlanmıştır. Sonuçlar; çimento içeriği, çimento tipi, sülfat tipi, kür süresi, donma çözülme çevrim sayısı olmak üzere 4 değişken parametre ile değerlendirilmiştir.

4.2.1. Çimento Stabilizasyonunun Atterberg Limitlerine Etkisi

Kaolin kilinin çimento stabilizasyonu sonrasında Atterberg limitlerindeki değişimi gözlemlemek amacı ile ASTM D 4318-10 standartlarına uygun olarak likit limit, plastik limit deneyleri yapılmıştır. % 5,10 ve 15 oranında normal portland çimentosu içeren kaolinin likit limit, plastik limit ve plastisite değerleri çimento içeriğine bağlı olarak Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Çimento içeriğinin Atterberg limitlerine etkisi

Şekilde de görüldüğü üzere çimento içeriği arttıkça çimento katkılı kaolinin likit limiti değeri belirgin olarak azalmaktadır. Çimento içermeyen kaolin kilinin likit limit değeri 56 iken çimento içeriğinin % 15 seviyesine yükselmesi ile birlikte likit limit değeri 48 olarak belirlenmiştir. Ancak, plastik limit değerleri incelendiğinde çimento katkısının artışı ile birlikte plastik limitin neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, plastisite indeksinin çimento içeriğinin artışıyla kısmen azaldığı görülmektedir. Malzemelerin çalışabilirliğinin düşen plastisite indeksi ile arttığı bilinmektedir (Baran et al., 2001). Böylelikle, daha yüksek çimento içeriklerinde kaolin kilinin çalışabilirliği artmaktadır.

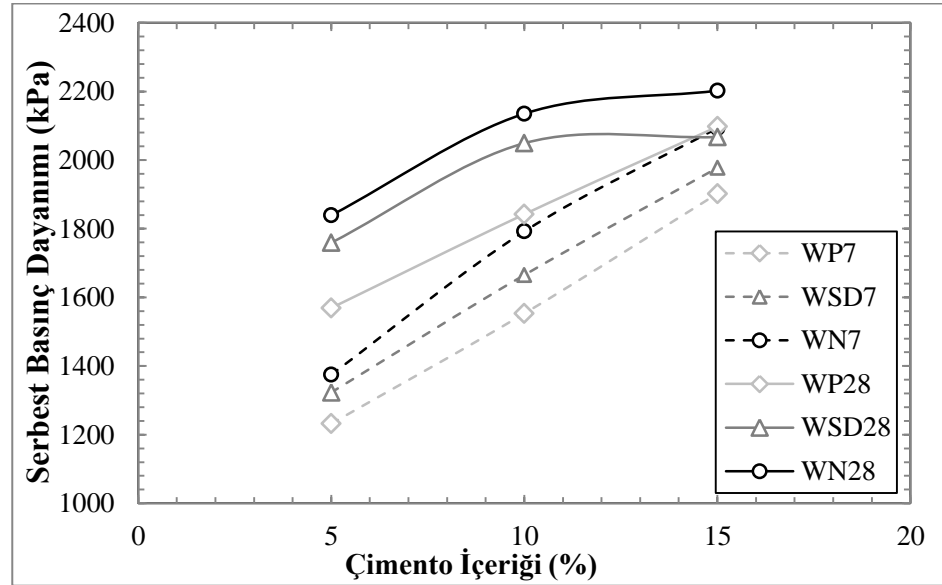
4.2.2. Dayanım özelliklerinin incelenmesi

Şekil 4.13'te farklı oranlarda ve farklı tiplerde çimento ile stabilize edilmiş örneklerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları verilmiştir. Şekilde belirtilen örnekler sülfat etkisine maruz bırakılmamış örnekler olup, çimento stabilizasyonunda temel etken olarak kabul edilen çimento içeriğinin ve tipinin dayanım üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere kür süresinden ve çimento tipinden bağımsız olarak çimento içeriği arttıkça serbest basınç dayanımı artmaktadır. Çimento stabilizasyonunda dayanım artışının hidrasyon ve puzolonik olmak üzere iki önemli reaksiyon sonucu gerçekleştiği söylenebilmektedir. İlk 7 gündeki dayanım artışı çimento hidrasyonu ile daha uzun dönem olarak kabul edilebilen 28 günlük dayanım ise puzolonik reaksiyon ile kazanılmaktadır. 7 gün kür süresinde hidrasyon reaksiyonu çimento içeriği ile doğru orantılı olarak dayanım kazanımına neden olmaktadır. Bu nedenle, 7 gün kür süresindeki örneklerin serbest basınç dayanımları çimento içeriği ile birlikte lineer olarak artmaktadır. Diğer yandan, kaolin kili yüksek puzolanik potansiyeli sebebiyle uzun dönemde gerçekleşen puzolanik reaksiyonda yer almakta ve tükenmektedir. Kaolinin puzolanik reaksiyona katılması ile birlikte artı C-S-H ve C-A-S-H ürünleri oluşmaktadır. Ancak, kaolinin çimentomsu ürünlere olan bu olumlu katkısı % 10 olarak belirlenen çimento içeriğine kadar gerçekleşmektedir. %10 ve daha düşük çimento içeriğinde çimentomsu ürünler hidrasyon ve kaolin kilinin de kullanıldığı puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır. Daha yüksek çimento içeriklerinde ise, kaolin kilinin tükenmesi puzolanik reaksiyonun durmasına ve çimentomsu ürünlerin sadece hidrasyon sonucu oluşmasına neden olmaktadır (Kamruzzaman 2002). Şekil 4.13'te de puzolanik reaksiyonların meydana geldiği 28 gün kür süresine sahip örnekler incelendiğinde, normal portland çimentosu ile

sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde % 10 çimento içeriğinden % 15 çimento içeriğine çıkıldığında serbest basınç dayanımı artışının daha düşük çimento içeriklerine kıyasla azaldığı görülmektedir. Bu durum, % 15 çimento içeriğinde kaolin kilinden dolayı puzolanik reaksiyonunun durması sonucunda gerçekleşmektedir.

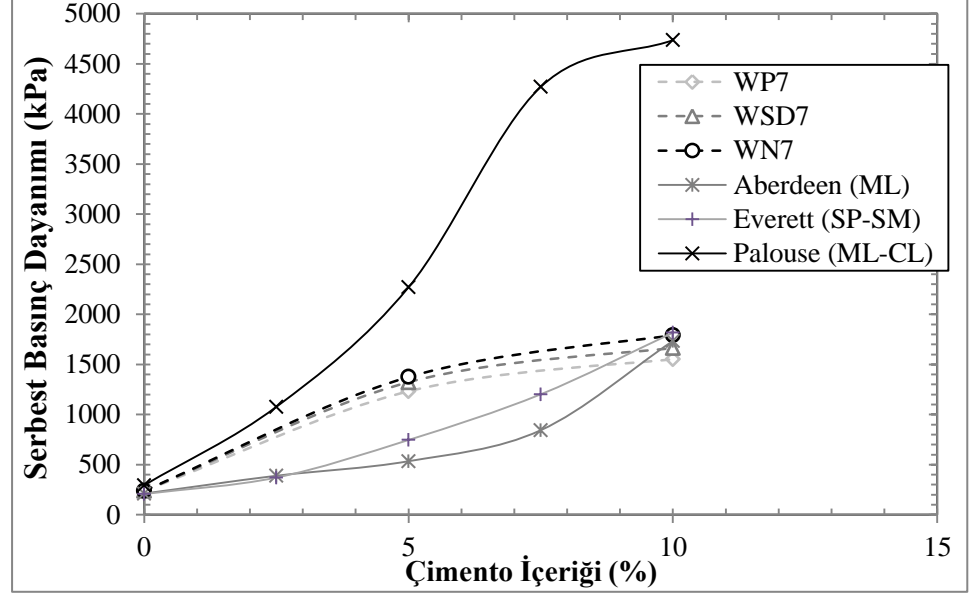
Şekilde görüldüğü üzere 7 günlük dayanımlar göz önüne alındığında aynı çimento içeriğindeki örneklerde en büyük serbest basınç dayanımı % 15 oranında normal portland çimentosu içeren örneklerde 2093 kPa olarak, en düşük serbest basınç dayanımı ise % 5 oranında puzolanik çimento içeren örneklerde 1232 kPa olarak elde edilmiştir. % 15 çimento içeriğinde normal portland çimento içeren 7 gün kür süresindeki örneğin serbest basınç dayanımı aynı çimento içeriğinde puzolanik çimento içeren 28 günlük örneğin serbest basınç dayanımına eşittir. Bu durum, puzolanik çimentonun daha uzun dönemde dayanım kazanabilmesi ile açıklanabilmektedir. 90 gün kür süresi içerisinde aynı örneğin serbest basınç dayanımının normal portland çimentosu içeren örneğin serbest basınç dayanımına yaklaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.13. Çimento içeriğinin ve türünün serbest basınç dayanımına etkisi

Literatürde çimento içeriğinin artışı ile birlikte serbest basınç dayanımının arttığı birçok çalışmada gözlemlenmiştir (Horpibulsuk et al., 2004; Chew et al., 2004; Horpibulsuk et al., 2012). (Sariosseiri and Muhunthan, 2009) çalışmalarında ML, SP-SM ve ML-CL türü zeminleri optimum su içeriğinde % 2.5, 5, 7.5 ve 10 çimento oranlarında stabilize etmişler ve 7 gün sonunda

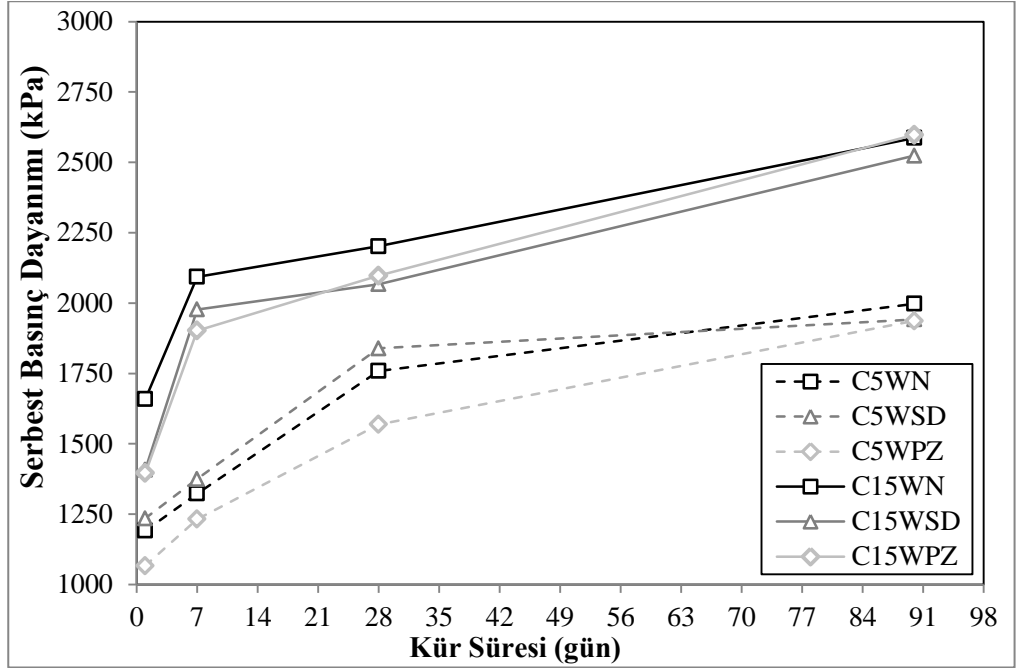
örneklerin serbest basınç dayanımlarını elde etmişlerdir. Şekil 4.14'te farklı tipteki çimentolar ile stabilize edilmiş zeminlerin çimento içeriğine bağlı olarak bu çalışmada elde edilen serbest basınç dayanımları ile Sariosseiri and Muhunthan (2009) tarafından elde edilen serbest basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.14. 7 gün kür süresine sahip örneklerin çimento içeriğine bağlı olarak serbest basınç dayanımı değişimi

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, zemin tipinden ve çimento tipinden bağımsız olarak çimento içeriğinin artışı ile birlikte serbest basınç dayanımı belirgin olarak artmaktadır. Şekil 4.15'te % 5 ve 15 oranında farklı tiplerde çimento ile stabilize edilmiş örneklerin kür süresi ile serbest basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere kür süresi arttıkça, serbest basınç dayanımı tüm çimento içeriklerinde ve türlerinde artış göstermiştir. İlk 7 gün kür süresi içerisinde % 15 çimento içeren örneklerin dayanım kazanma hızı, % 5 çimento içeren örneklere kıyasla daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu durum, daha önce açıklandığı üzere zemin ile çimento arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir. Hidratasyon reaksiyonu çimento içeriği ile doğru orantılı olarak dayanım artışı sağladığından ilk 7 günlük dönemde % 15 çimento içeren örneklerin dayanım kazancı % 5 çimento içeren örneklere oranla çok daha fazla olmaktadır. Ayrıca, % 15 çimento içeren örneklerde 7 gün sonrasındaki dayanım artışı ilk 7 güne kıyasla oldukça düşmektedir. Örneklerin 90 günlük dayanımları incelendiğinde, aynı oranda çimento içeren örneklerde farklı çimento tiplerinde serbest basınç dayanımı değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. 1 günlük dayanımı normal portland çimentosundan düşük olan

puzolanik çimento içeren örnekler 90 gün sonrasında normal portland çimento içeren örneklerin dayanımlarına erişmiştir. Bu durum, genel olarak bilindiği üzere puzolanik çimentonun ilk dönemlerdeki dayanımlarının düşük olması ve ilerleyen dönemlerde dayanım kazanması ile açıklanabilmektedir.



Şekil 4.15. Kür süresinin % 5 ve %15 çimento içeren örneklerin serbest basınç dayanımına etkisi

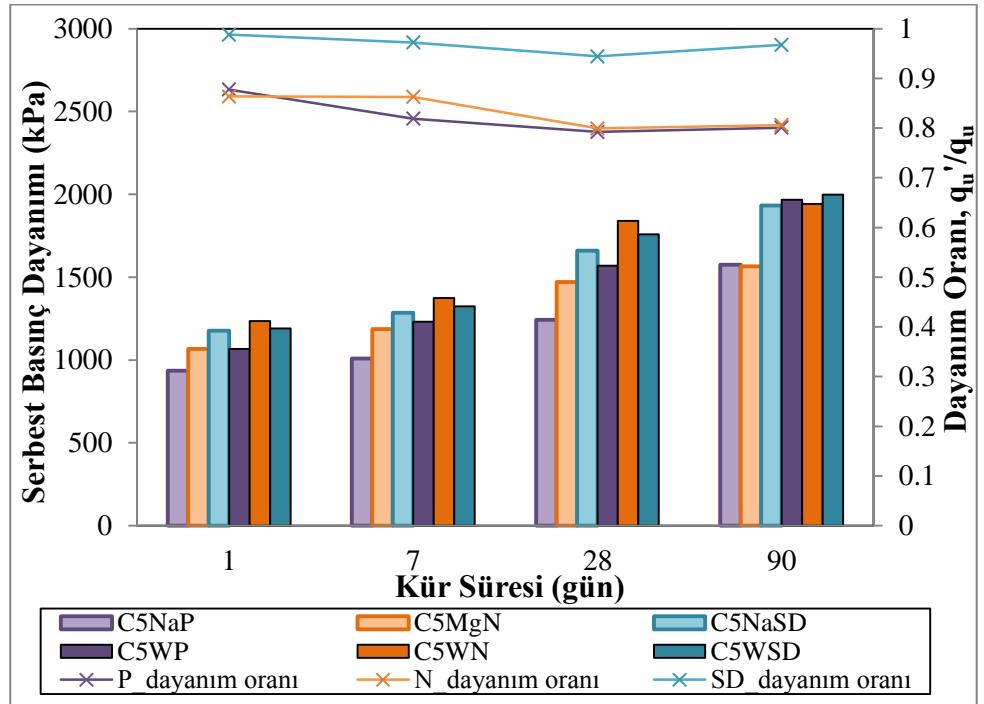
4.2.3. Sülfatın dayanım özellikleri üzerindeki etkisi

Bir önceki bölümde kaolin kilinin sülfat etkisine maruz bırakılmamış durumları dikkate alınarak, çimento stabilizasyonunda temel etkenler olarak kabul edilen kür süresinin, çimento içeriğinin ve çimento tipinin dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bölümde ise, çimento stabilize zeminlerde sülfat bulunması durumunda sülfatın dayanım özelliklerine etkisi incelenecektir. Sülfat etkisi örneklerin optimum su içeriğinin çözelti konsantrasyonu ile hazırlanması ve örneklerin bu çözelti ile karıştırılıp, standart enerjiyle sıkıştırılması yöntemi ile hazırlanması sonucu gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında iki farklı çözelti tipi magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ve sodyum sülfat ($NaSO_4$) seçilmiştir. Sülfat etkisinde çimentoların performanslarını incelemek amacı ile de üç farklı çimento tipi kullanılmıştır.

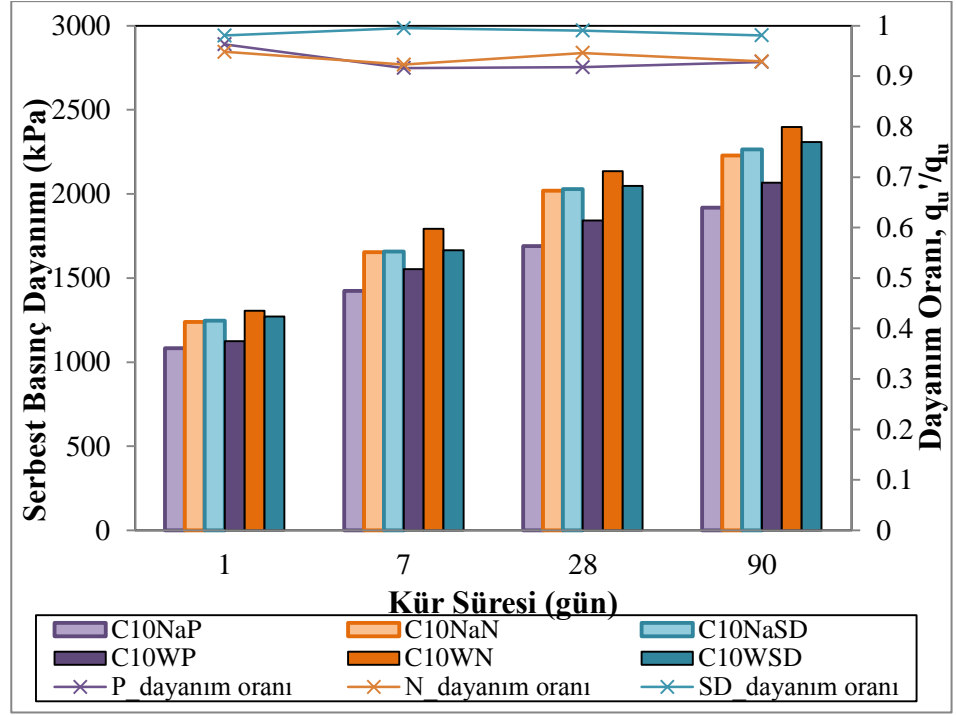
Şekil 4.16'da %1 konsantrasyonunda NaSO_4 çözeltisi içeren örneklerin serbest basınç dayanımları ve çözelti içermeyen örneklere kıyasla serbest basınç dayanımında meydana gelen azalma oranı görülmektedir. Dayanım oranı, aynı koşullarda hazırlanmış sülfat içeren örneğin serbest basınç dayanımı ile sülfat içermeyen örneğin serbest basınç dayanımının oranı olarak tanımlanır. Dayanım oranı formül ile ifade edilirse;

$$\text{dayanım oranı} = \frac{q_u'}{q_u} \quad (5.1)$$

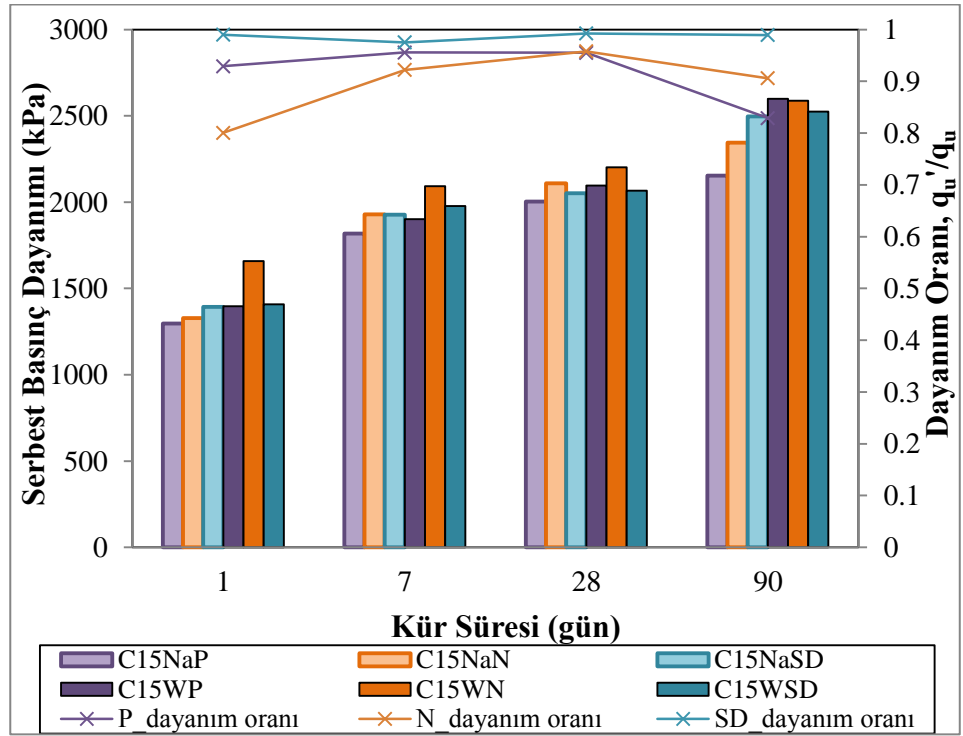
Burada; q_u' sülfat içeren örneğin serbest basınç dayanımı, q_u ise aynı çimento tipinde, çimento içeriğinde ve kür süresinde sülfat içermeyen örneğin serbest basınç dayanımını ifade etmektedir.



(a)



(b)



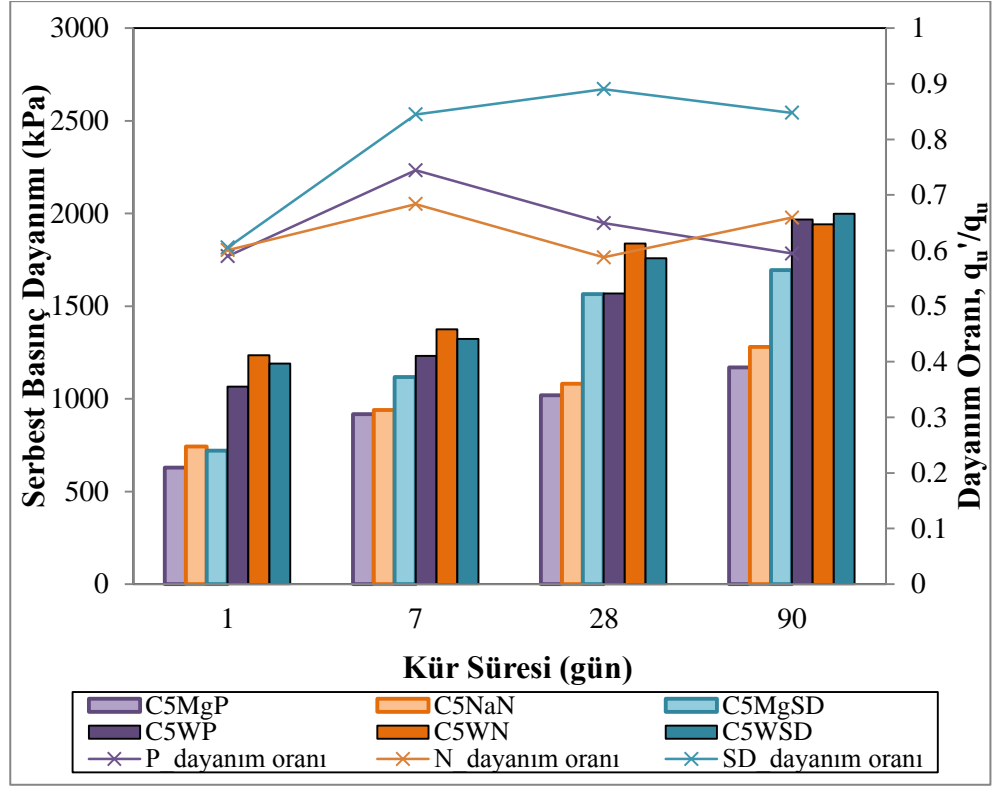
(c)

Şekil 4.16. (a) % 5 çimento içeren (b) % 10 çimento içeren (c) % 15 çimento içeren örneklerin sodyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi

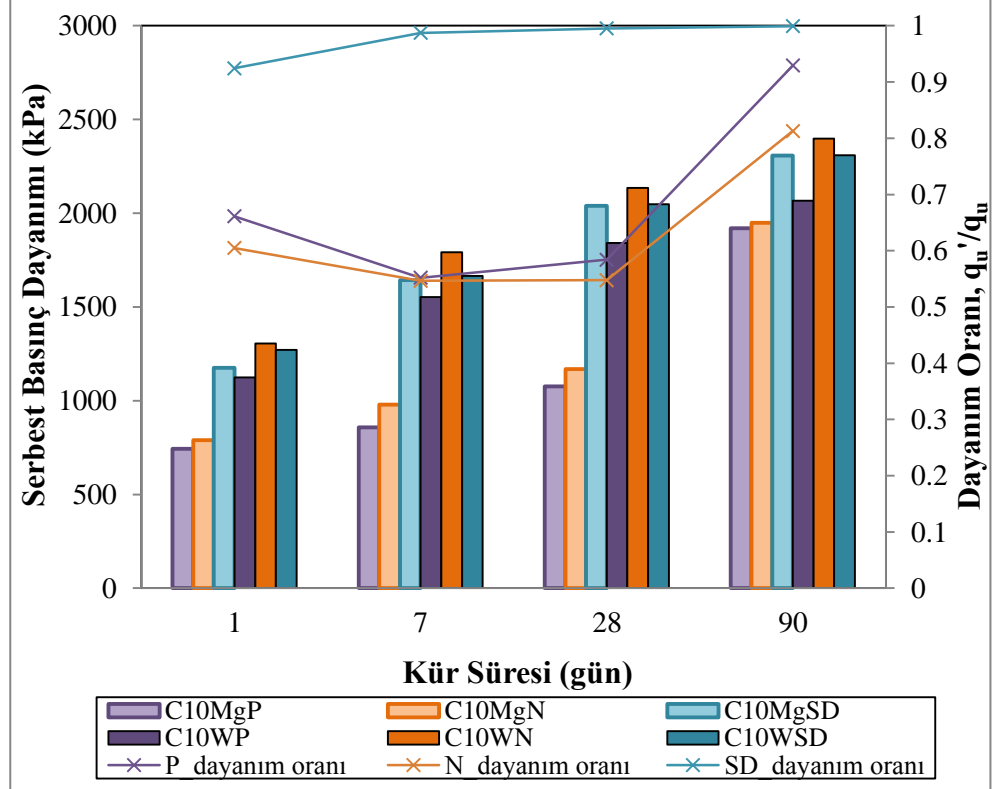
Şekil 4.16 (a)'da görüldüğü üzere, % 5 çimento içeren örneklerde sodyum sülfat bulunması ile birlikte serbest basınç dayanımlarında bir miktar azalma meydana gelmiştir. Bu durum, örneklerin içerdikleri NaSO_4 çözeltisi neticesinde oluşan etrenjit yapısı ile açıklanabilmektedir. Ortamda sülfat bulunduğu takdirde oluşan iki aşamalı reaksiyonlar genleşme, mikro çatlaklar oluşturmakta ve dayanım kaybına neden olmaktadır. Kür süresi ile birlikte örneklerin dayanımları artmakta ancak sülfata dayanıklı çimento içermeyen örnekler hariç sülfat içermeyen örneklerin dayanımına ulaşamamaktadır. Dayanım oranları incelendiğinde, sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde dayanım oranının 0.97 ile 0.94 arasında değiştiği görülmektedir. Sülfata dayanıklı çimento düşük oranda yani % 5'ten az miktarda C_3A içerdiği için sülfat etkisinin oluşturduğu dayanım kaybı % 6 'dan az olmaktadır. Ancak aynı durum, puzolanik ve normal portland çimentosu içeren örneklerde söz konusu olmamaktadır. Puzolanik ve normal çimento içeren örneklerdeki dayanım kaybı % 16 ile % 20 arasında değişmektedir.

% 10 ve % 15 çimento içeren örneklerde sodyum sülfat kaynaklı dayanım kaybı gözlemlenmektedir. Çimento içeriğinin artışı ile birlikte serbest basınç dayanımı artmış ancak sodyum sülfat içermeyen örneklere kıyasla dayanımda azalma söz konusu olmaktadır. Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde tüm kür süreleri için maksimum % 2.5 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Yani, sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde çimento içeriğinin artışı ile birlikte dayanım kaybının azaldığı söylenebilir. %10 oranında puzolanik ve portland çimento içeren örneklerde ise sülfat içeren örneklerde sülfat içermeyen örneklere oranla maksimum % 9'luk bir kayıp gerçekleşmiştir. Ancak çimento içeriği arttıkça (%15 çimento içeriğinde) dayanım kaybının % 20 değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.

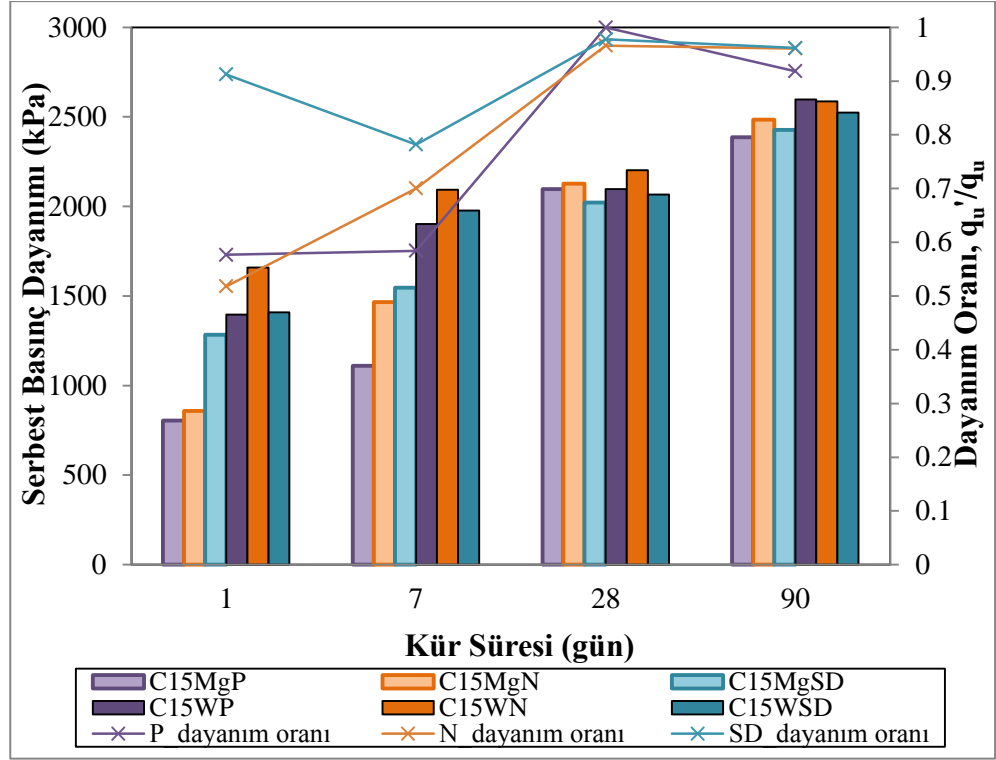
Şekil 4.17'de %1 konsantrasyonunda MgSO_4 çözeltisi içeren örneklerin serbest basınç dayanımları ve çözelti içermeyen örneklere kıyasla serbest basınç dayanımında meydana gelen azalma oranı görülmektedir. NaSO_4 çözeltisi içeren örneklerde olduğu gibi örneklerde oluşan etrenjit yapısı oluşturduğu genleşme ve mikro çatlaklarla dayanım kaybına neden olabilmektedir. Öte yandan, magnezyum tuzları sadece etrenjit oluşumuna neden olmamakla beraber çimentonun bağlayıcılık özelliğini de azaltmaktadır. Bu nedendir ki, etrenjit uzun vadede oluşmasına karşın örneklerde 1. ve 7. günlerde oldukça yüksek dayanım kayıpları gerçekleşmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.17. (a) % 5 çimento içeren (b) % 10 çimento içeren (c) % 15 çimento içeren örneklerin magnezyum sülfat içeriği ile serbest basınç dayanımı ilişkisi

Dayanım oranları göz önüne alındığında, % 5 oranında sülfata dayanıklı çimento ve sülfat içeren örneklerin serbest basınç dayanımı aynı koşullarda hazırlanan ve sülfat içeren örneklere kıyasla % 11 ile % 23 oranla azalım göstermiştir. Aynı çimento içeriğinde, normal portland ya da puzzolanik çimento ve sülfat içeren örneklerde sülfat içermeyen örneklere göre % 26 ile % 42 oranında bir dayanım kaybı gerçekleşmiştir. % 10 ve % 15 çimento içeren örneklerde sülfat içeriği ile birlikte dayanımda % 50'ye varan kayıplar belirlenmiştir. Deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, $MgSO_4$ çözeltisi $NaSO_4$ çözeltisine göre daha agresif olmakta ve örneklere daha çok zarar vermektedir. Sonuç olarak, $MgSO_4$ çözeltisinin hem etrenjit oluşumuna neden olması hem de çimentonun bağlayıcılık özelliğini azaltması nedeniyle büyük dayanım kayıplarına yol açtığı söylenebilir.

Çizelge 4.1'de magnezyum ve sodyum sülfat içeren örneklerin serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımları verilmiştir.

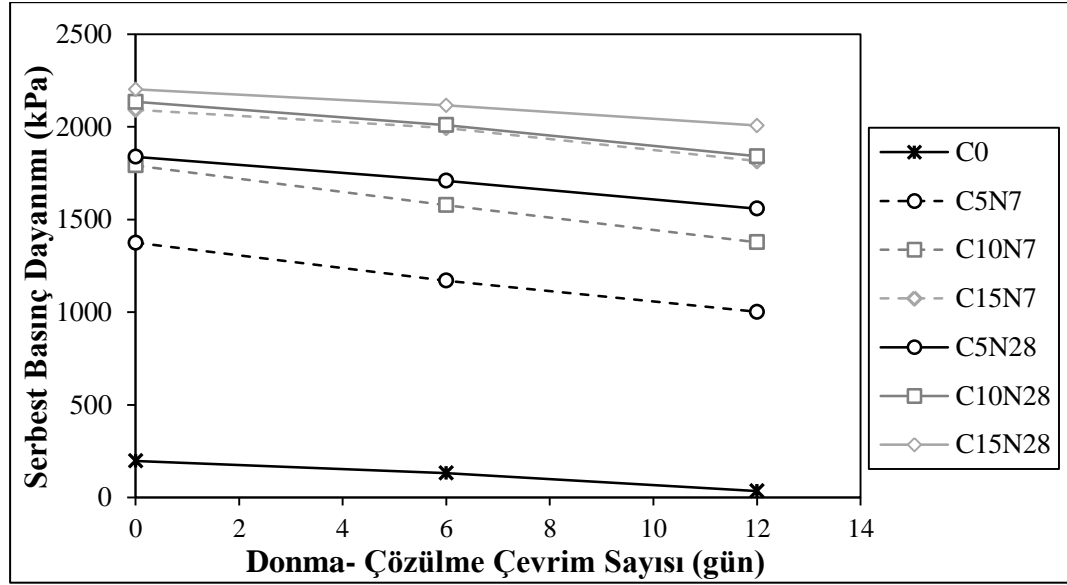
Çizelge 4.1 Farklı tipte ve oranlarda çimento içeren örneklerin sülfat etkisi altında elde edilen serbest basınç dayanımları

Örnek Adı	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Örnek Adı	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Örnek Adı	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
C5WP1	1067	C5WN1	1235	C5WSD1	1191
C5WP7	1232	C5WN7	1375	C5WSD7	1323
C5WP28	1569	C5WN28	1839	C5WSD28	1759
C5WP90	1967	C5WN90	1942	C5WSD90	1998
C10WP1	1124	C10WN1	1306	C10WSD1	1271
C10WP7	1553	C10WN7	1792	C10WSD7	1665
C10WP28	1842	C10WN28	2135	C10WSD28	2049
C10WPZ90	2066	C10WN90	2398	C10WSD90	2309
C15WP1	1396	C15WN1	1659	C15WSD1	1408
C15WP7	1902	C15WN7	2093	C15WSD7	1977
C15WP28	2097	C15WN28	2202	C15WSD28	2067
C15WP90	2598	C15WN90	2587	C15WSD90	2524
C5Na1P1	936	C5Na1N1	1067	C5Na1SD1	1177
C5Na1P7	1009	C5Na1N7	1186	C5Na1SD7	1286
C5Na1P28	1243	C5Na1N28	1470	C5Na1SD28	1661
C5Na1P90	1575	C5Na1N90	1565	C5Na1SD90	1933
C10Na1P1	1083	C10Na1N1	1239	C10Na1SD1	1247
C10Na1P7	1423	C10Na1N7	1654	C10Na1SD7	1657
C10Na1P28	1691	C10Na1N28	2020	C10Na1SD28	2029
C10Na1P90	1918	C10Na1N90	2228	C10Na1SD90	2265
C15Na1P1	1297	C15Na1N1	1328	C15Na1SD1	1394
C15Na1P7	1818	C15Na1N7	1930	C15Na1SD7	1928
C15Na1P28	2003	C15Na1N28	2110	C15Na1SD28	2052
C15Na1P90	2154	C15Na1N90	2344	C15Na1SD90	2497

4.2.4. Donma-çözülmenin dayanım özellikleri üzerindeki etkisi

Çimento stabilize zeminlerin donma çözülme etkisi altındaki dayanım parametrelerini incelemek amacı ile % 5, 10, 15 oranında normal portland ve sülfata dayanıklı çimento içeren örnekler hazırlanmıştır. Örnekler; 7 ve 28 gün kür odasında bekletildikten sonra 6 ve 12 çevrimlik donma-çözülme maruz bırakılmıştır. Örneklerdeki dayanım kaybını belirlemek amacıyla donma-çözülme deneyi sonrasında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.18'de farklı

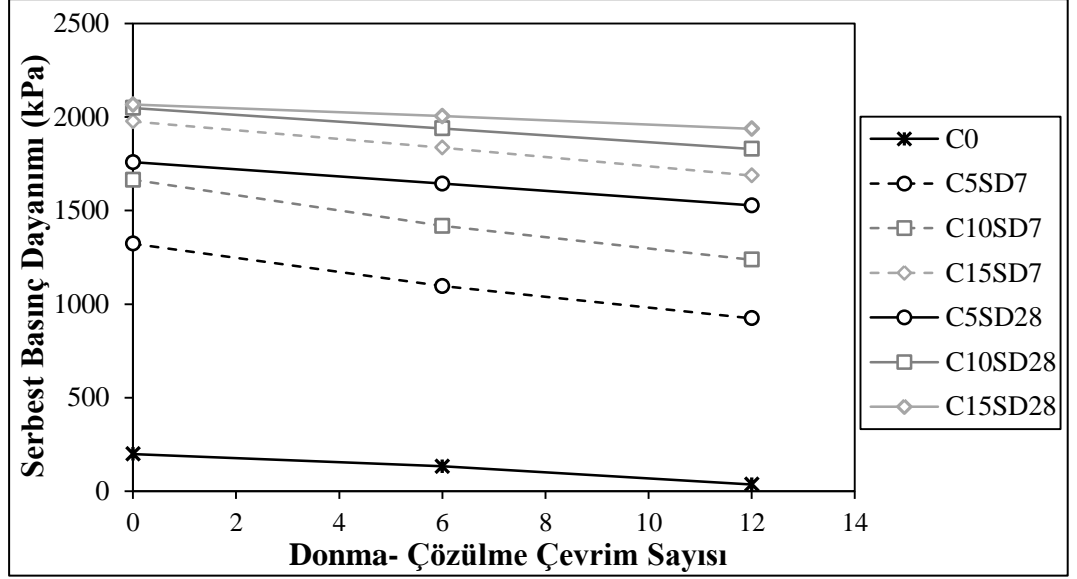
oranlarda normal portland çimentosu içeren 7 ve 28 gün kür odasında bekletilmiş örneklerin donma çözülme dayanımlarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 4.18. Farklı oranlarda normal portland çimentosu içeren örneklerin donma çözülme altında serbest basınç değişimi

Normal portland çimentosu içeren örneklerde 6 ve 12 çevrim sonucunda donma çözülme ile serbest basınç dayanımında belirgin azalma meydana gelmiştir. Ancak, donma çözülmeye tabi tutulmayan örnekler arasında hem 7 gün kür süresi hem de 28 gün kür süresi içinde en büyük serbest basınç değerlerine % 15 çimento içeriğine sahip örnekler ulaşmıştır. Buna karşılık, çimento içermeyen örneklerde ise donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımındaki azalma çimento içeren örnekler göre daha fazla olmaktadır. Çimento içermeyen örneklerde 6 çevrim sonrası dayanımda % 34 oranında, 12 çevrim sonrasında ise dayanımda % 81 oranında azalma meydana gelmiştir. Maksimum serbest basınç dayanımına sahip 28 gün kür odasında bekletilen % 15 çimento içeriğindeki örnekte 6 çevrimlik donma çözülme sonrasında % 8 oranında, 12 çevrim sonunda ise % 11 oranında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Bu nedenle, çimento stabilizasyonunun donma çözülme nedeniyle oluşabilecek dayanım kayıplarını önlediği düşünülebilir.

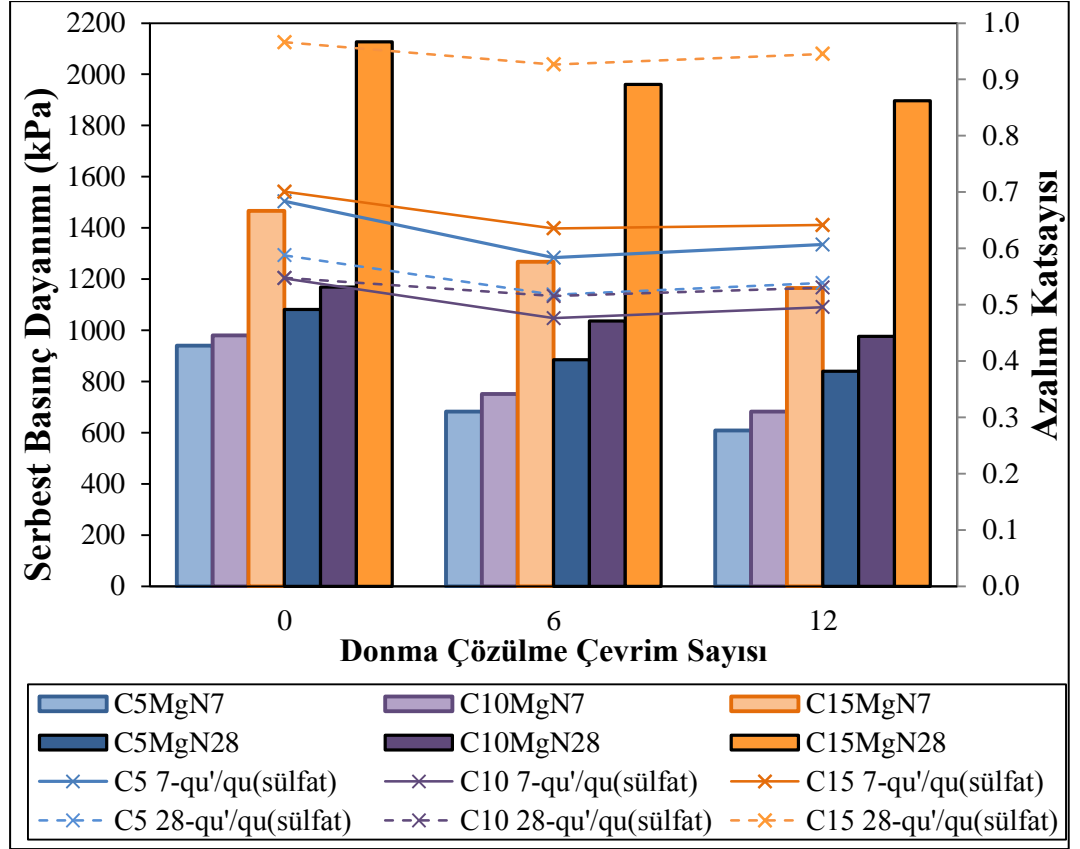
Şekil 4.19'da sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin 0, 6 ve 12 çevrim sonrasında elde edilen serbest basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı oranlarda sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin donma çözülme altında serbest basınç değişimi

Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde normal portland çimentosu içeren örneklerde de olduğu gibi 6 ve 12 çevrim sonucunda serbest basınç dayanımlarında belirli oranlarda azalma meydana gelmiştir. En büyük serbest basınç değeri normal portland çimentosu içeren örnekte olduğu gibi 28 gün kür odasında bekletilen ve % 15 çimento içeren örnekte elde edilmiştir. Aynı örnekte 6 çevrimlik donma çözülme sonrasında % 3 oranında, 12 çevrimlik donma çözülme sonrasında % 6 oranında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. En düşük serbest basınç dayanımının elde edildiği C5SD7 örneğinin serbest basınç dayanımında 6 çevrimde %17, 12 çevrimde ise % 30 oranında kayıp gerçekleşmiştir. Görüldüğü üzere, çimento içeriğinin ve kür süresinin artışı ile birlikte donma çözülmeye karşı direnç artmaktadır.

Sülfat içeren zeminlerin donma çözülme etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacı ile normal portland çimentosu ile hazırlanan ve sülfat çözeltisi içeren örnekler 6 ve 12 çevrimlik donma çözülmeye maruz bırakılmıştır. Şekil 4.20'de sülfat çözeltisi içeren ve donma çözülmeye maruz bırakılan örneklerin serbest basınç dayanımları verilmiştir. Donma çözülme etkisi altındaki örneklerde sadece sülfat dolayısı ile oluşan dayanım kaybı da azalım katsayısı ile ifade edilmiştir. Azalım katsayısı, aynı koşullarda hazırlanan ve aynı donma çözülme çevrimine maruz bırakılan sülfat içeren örnek ile içermeyen örneğin dayanımlarının oranı olarak ifade edilmektedir.

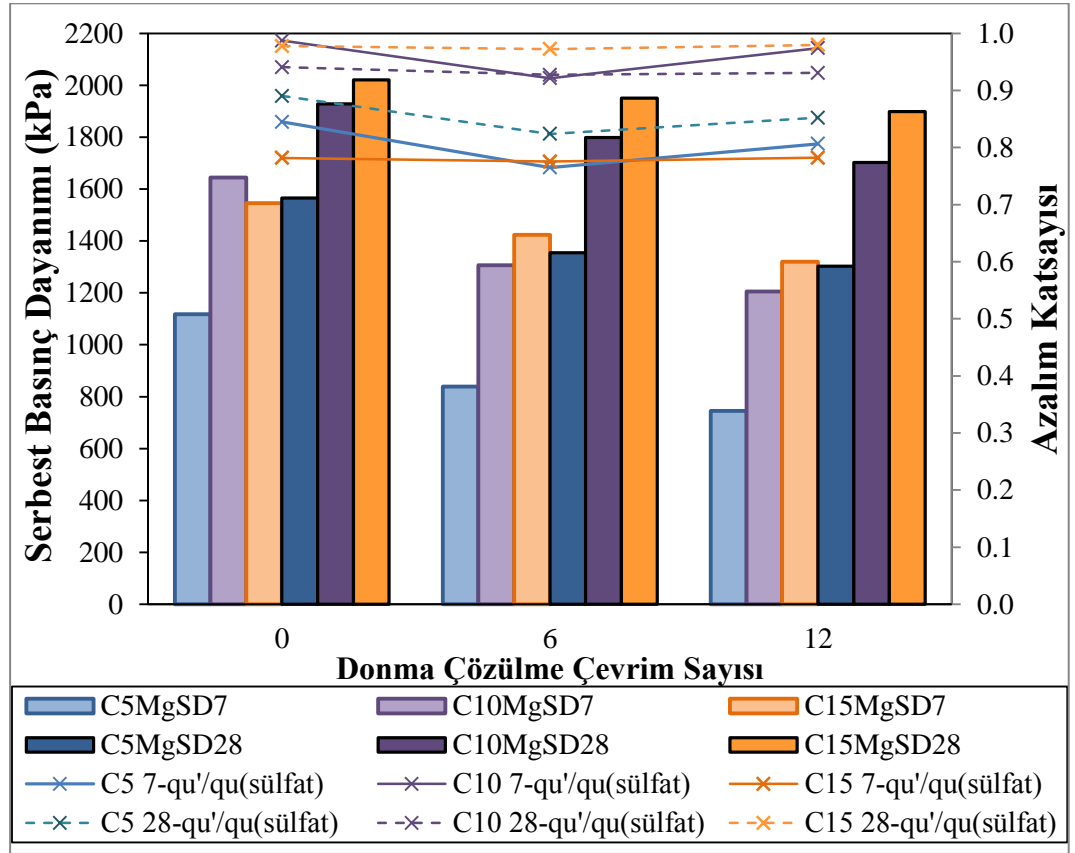


Şekil 4.20. Sülfat ve normal portland çimentosu içeren örneklerin donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımları

Şekil 4.20'de görüldüğü üzere, donma çözülme çevrim sayısı arttıkça örneklerin serbest basınç dayanımında bir miktar azalma gerçekleşmiştir. 7 gün kür süresine sahip % 15 çimento ve sülfat içeren örneklerde 6 donma çözülme çevrimi sonrasında dayanımda % 13.5 azalma, 12 donma çözülme sonrasında ise dayanımda % 20.5 oranında azalma meydana gelmiştir. % 5 çimento içeren örneklerde ise, 6 çevrim sonrasında örneklerin dayanımında % 27 oranında, 12 çevrim sonrasında % 35 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, çimento içeriğinin artışı ile birlikte donma-çözülme kaynaklı dayanım kaybı azalmaktadır. Ancak, örneklerin dayanım kayıpları sülfat etkisi ile donma çözülme etkisi altında gerçekleşmektedir. Sadece, sülfattan kaynaklanan dayanım kaybını elde etmek amacı ile aynı koşullarda sülfat içeren örneklerin dayanımları ile sülfat içermeyen örneklerin dayanımları birbirleri ile oranlanarak bir azalım katsayısı elde edilmiştir. % 15 çimento içeren örneklerde sülfat etkisi ile oluşan dayanım kaybı diğer örneklere oranla daha düşük olmaktadır. Bu durum, çimento içeriğinin artması ile daha fazla miktarda oluşan C-S-H jellerinin dayanım artışı üzerindeki etkisinin magnezyumun yıkıcı etkisinden daha baskın olması ile açıklanabilmektedir. 28 gün kür süresine sahip örneklerde % 5 çimento içeriğinde

6 çevrimde % 18, 12 çevrimde ise % 22 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Çimento içeriği % 10'a ulaştığında dayanım kaybı 12 çevrimde % 16 oranında olmaktadır. % 15 çimento içeriğinde ise 12 çevrimde dayanım kaybı % 10 değerine düşmektedir. 7 gün kür süresine sahip örneklerde olduğu gibi 28 gün kür odasında bekletilen örneklerin de donma çözölmeye karşı olan direnci çimento içeriğinin artması ile artmaktadır.

Şekil 4.21'de sülfata dayanıklı çimento ve sülfat içeren örneklerin donma çözölmeye çevrim sayısı ile serbest basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.21. Sülfat ve sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin donma çözölmeye sonrası serbest basınç dayanımları

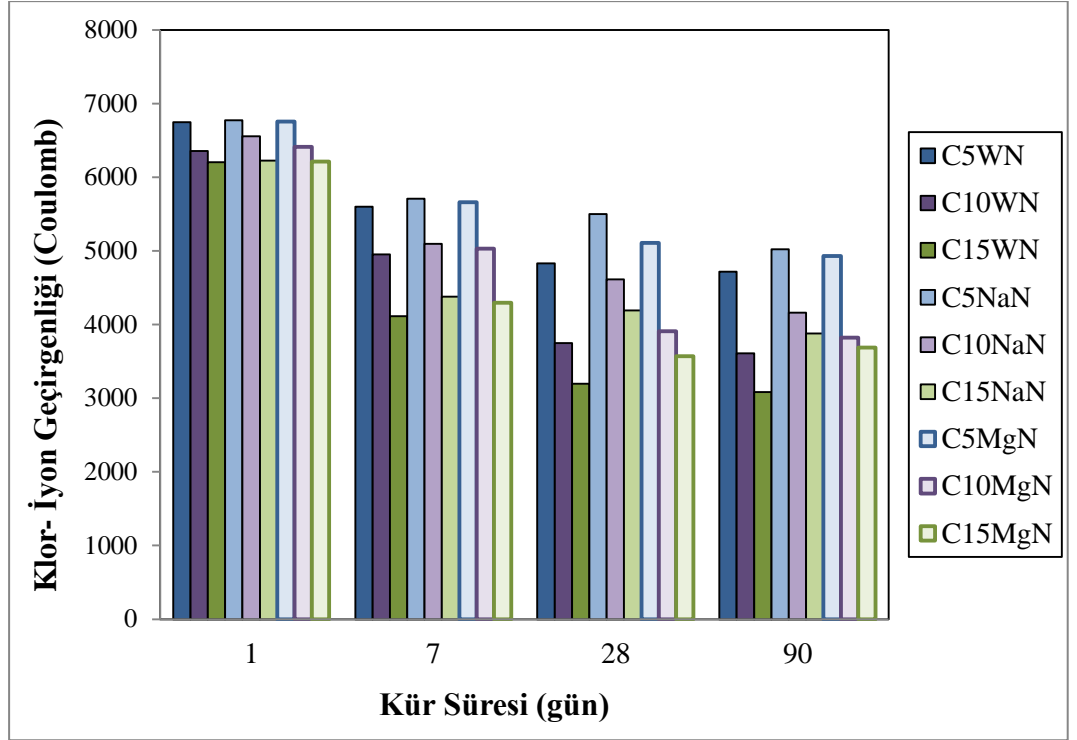
Şekil 4.21'de de görüldüğü üzere, donma çözölmeye çevrim sayısı arttıkça örneklerin serbest basınç dayanımında bir miktar azalma meydana gelmiştir. 7 gün kür süresine sahip % 15 çimento ve sülfat içeren örneklerde 6 donma çözölmeye çevrimi sonrasında dayanımında % 8 azalma, 12 donma çözölmeye sonrasında ise dayanımında % 14.5 oranında azalma meydana gelmiştir. % 5 çimento içeren örneklerde ise, 6 çevrim sonrasında örneklerin dayanımında % 25 oranında, 12 çevrim sonrasında % 33 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Deney

sonuçlarından anlaşılacağı üzere çimento içeriğinin artışı ile birlikte donma-çözülme kaynaklı dayanım kaybı azalmaktadır. Örneklerin dayanım kayıplarının hem sülfat etkisinden hem de donma çözülme etkisinden kaynaklandığı bilinmektedir. Sadece, sülfattan kaynaklanan dayanım kaybını elde etmek amacı ile aynı koşullarda sülfat içeren örneklerin dayanımları ile sülfat içermeyen örneklerin dayanımları birbirleri ile oranlanarak normal portland çimentosu içeren örneklerde olduğu gibi bir azalım katsayısı elde edilmiştir. Normal portland içeren örnekler dikkate alındığında sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde sülfat kaynaklı oluşan dayanım kaybı azalmaktadır. Normal portland çimentosu içeren örneklerde sülfat etkisi sonucu oluşan dayanım kaybı % 53 seviyesine kadar ulaşmaktadır. Ancak, sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde ise sülfat etkisi ile oluşan dayanım kaybı % 24 seviyesinde kalmaktadır. Bu durum sülfata dayanıklı çimentonun % 5 oranından daha az miktarlarda C_3A içermesi ile açıklanabilmektedir.

28 gün kür süresine sahip örneklerde % 5 çimento içeriğinde 6 çevrimde % 13.5, 12 çevrimde ise % 17 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Çimento içeriği % 10'a ulaştığında dayanım kaybı 12 çevrimde % 12 oranında olmaktadır. % 15 çimento içeriğinde ise 12 çevrimde dayanım kaybı % 6 değerine düşmektedir. 7 gün kür süresine sahip örneklerde olduğu gibi 28 gün kür odasında bekletilen örneklerin de donma çözülmeye karşı olan direnci çimento içeriğinin artması ile artmaktadır.

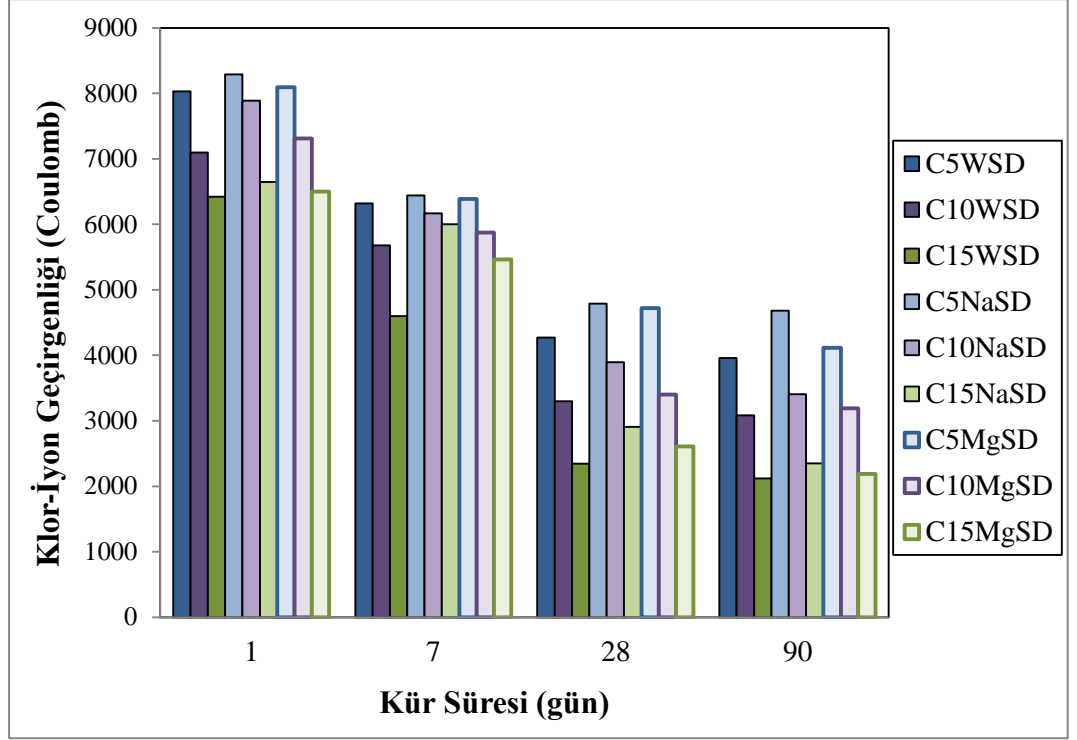
4.2.5. Geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi

Sülfatın geçirimsizlik özelliklerine etkisinin incelenmesi amacı ile hazırlanan örnekler deney günlerinde klor-iyon geçirimsizlik deneyine tabi tutulmuşlardır. Örneklerin, 60 dakika sonrasındaki coulomb değerleri klor-iyon geçirimsizlikleri olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.22'de normal portland çimentosu içeren örneklerin kür sürelerine bağlı olarak klor-iyon geçirimsizlik deney sonuçları verilmiştir. Deneylerin tekrarlanabilmesi amacı ile her değer 3 örneğin 60 dakikalık klor-iyon geçirimsizliği sonucunun ortalaması olarak verilmiştir. Çimento içermeyen kaolin kilinin geçirimsizlik değeri tüm kür sürelerinde 9800 Coulomb olarak ölçülmüştür.

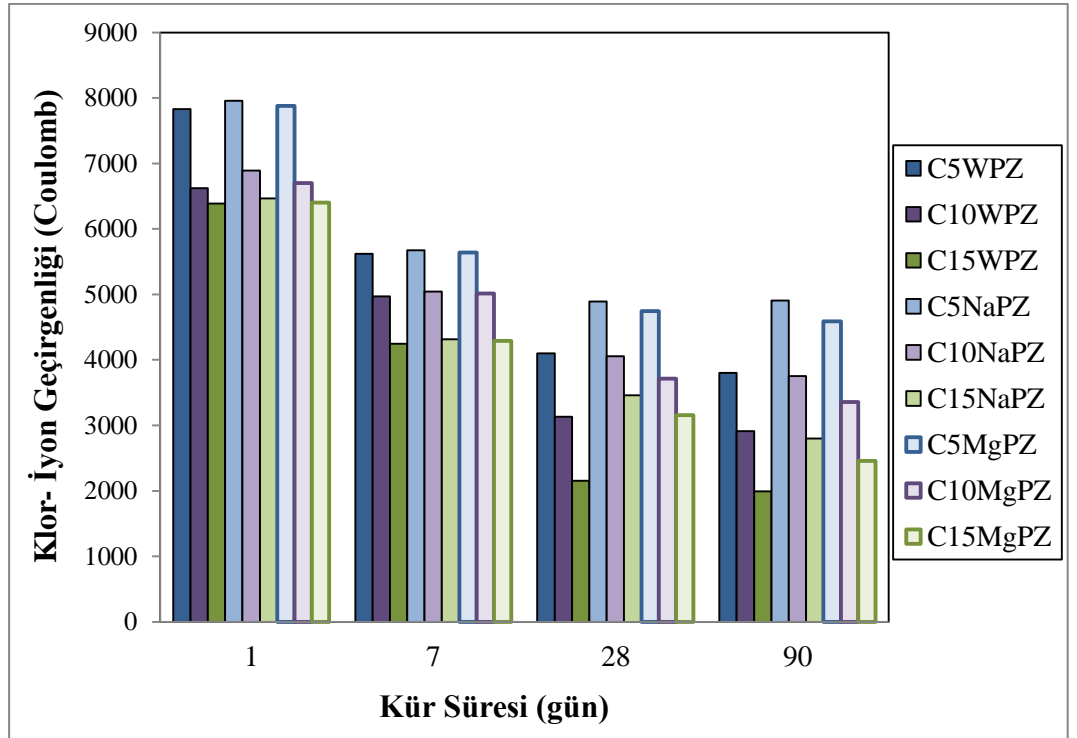


Şekil 4.22. Portland çimentosu içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri

Çimento içeriğinin artışı ile birlikte örneklerin klor-iyon geçirimsizlik değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Örneklerin kür süresi arttıkça beklenildiği üzere geçirimsizlik değerindeki azalma daha belirgin olmuştur. Bu durum, çimento hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerin sistemde olan boşlukları doldurarak örneklerin geçirgenliğini azaltması ile açıklanabilmektedir. Ayrıca çimentonun bağlayıcılık özelliği geçirimsizliği düşük olan daha yoğun bir yapının oluşumuna sebep olmuştur. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te de sırası ile sülfata dayanıklı ve puzolanik çimento içeren örneklerin geçirimsizlik deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.23. Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri

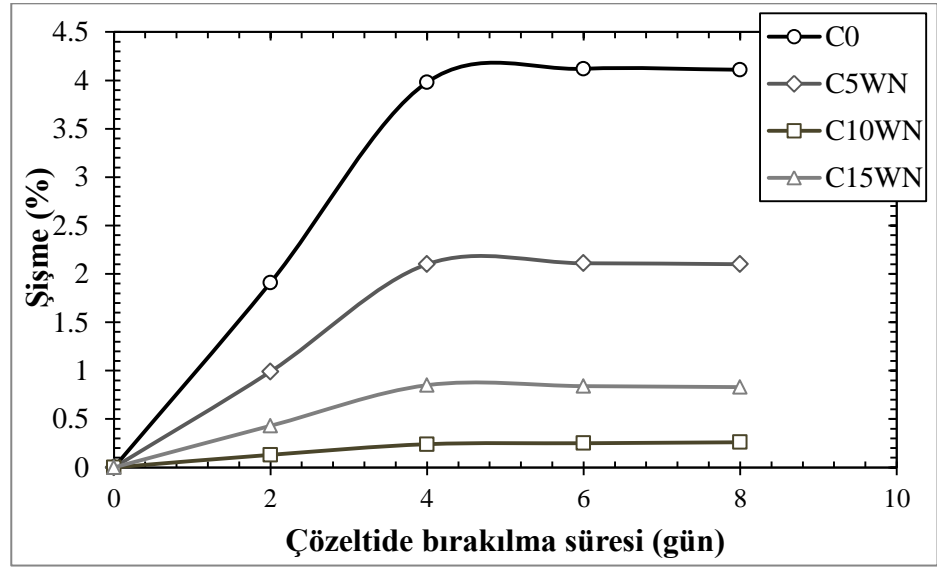


Şekil 4.24. Puzolanik çimento içeren örneklerin 60 dakika klor-iyon geçirgenlikleri

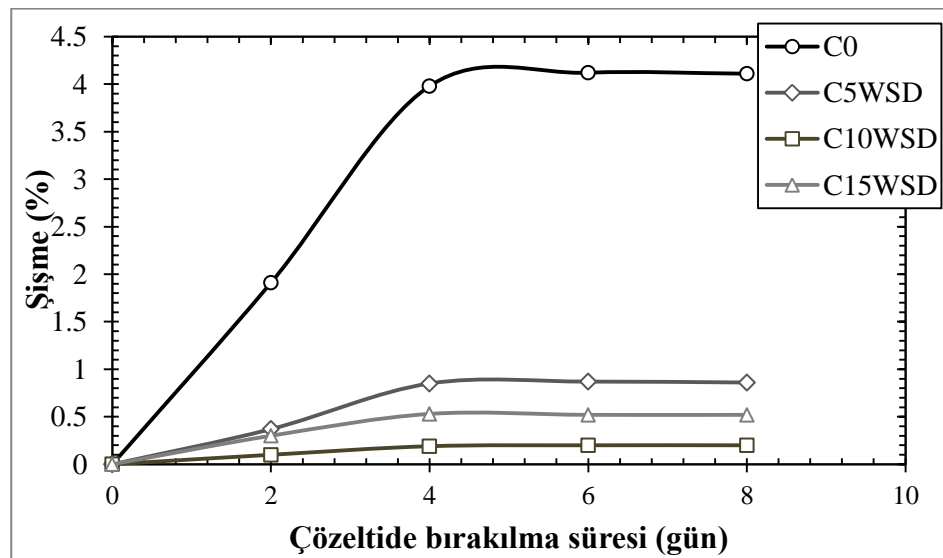
Çimento tipinden bağımsız olarak 7 gün kür süresine kadar, kür süresinin artışı ile birlikte örneklerin klor-iyon geçirgenlikleri belirgin olarak azalmıştır. Ancak, 28 ve 90 gün kür sürelerine sahip örneklerin klor-iyon geçirimsizliklerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Çimento hidrasyonu 1 ve 7 gün olarak belirtebileceğimiz erken dönemde 28, 90 güne oranla çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Magnezyum sülfat çözeltisi içermeyen örneklerde ilk 7 güne kadar, tüm çimento içeriklerinde portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirgenlik değeri sülfata dayanıklı çimento ve puzolanik çimento içeren örneklere göre daha düşük olmaktadır. 28 günlük kür süresinden sonra ise sülfata dayanıklı çimento ile puzolanik çimento içeren örneklerin geçirimsizliği normal portland çimentosu içeren örneklere göre daha düşük elde edilmiştir. Portland çimentosunun dayanım artışı erken dönemde (1 ve 7 gün) sülfata dayanıklı çimento ve puzolanik çimentoya göre daha hızlı daha sonraki dönemlerde ise daha yavaş gelişmektedir. Magnezyum sülfat içeren örneklerde de ilk 7 günde portland çimentosu içeren örneklerin klor-iyon geçirgenliği düşükken 28. günden itibaren sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin geçirimsizliği daha düşük olarak elde edilmektedir. Bu durum, sülfat etkisi sonucu oluşan sülfat alümina ürünlerinin şişme yaratarak örneklerde çatlaklar oluşturması ile açıklanabilmektedir. Fakat erken dönemlerde sülfatın etkisi tam olarak gerçekleşmediğinden normal portland çimentosu içeren örneklerin dayanımları da daha yüksek olduğu gibi geçirimsizlik değerleri de daha düşük olmaktadır. İlerleyen dönemlerde ise sülfat saldırısı oluşmakta ve sülfata dayanıklı çimento içeren örnekler portland çimentosu içeren örneklere kıyasla sülfata daha dirençli olduğundan sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin hem dayanımları yüksek olmakta hem de geçirimsizlik değerleri düşük olmaktadır. 1 günlük deney sonuçları dikkate alındığında puzolanik çimento içeren örneklerin klor-iyon geçirgenliği portland çimentosu içeren örneklerden yüksek olmakla beraber sülfata dayanıklı çimentoya göre daha düşük olarak elde edilmiştir. Bu durum çimentoların dayanım kazanma hızı ile açıklanabilir. 28. günden sonra puzolanik çimento içeren örneklerin klor-iyon geçirgenliği portland çimentosu içeren örneklere göre daha düşüktür. 28 günden sonra puzolanik çimento içeren örneklerin dayanımları puzolanik reaksiyonlar sonucu artmış ve oluşan C-S-H jellerinin boşlukları tıkanması sonucu örneklerin geçirgenliği azalmıştır. Ancak, 28 günden sonra sülfat etkisinden dolayı örneklerde mikro çatlaklar gözlemlenebilmektedir.

4.2.6. Şişme özelliklerinin incelenmesi

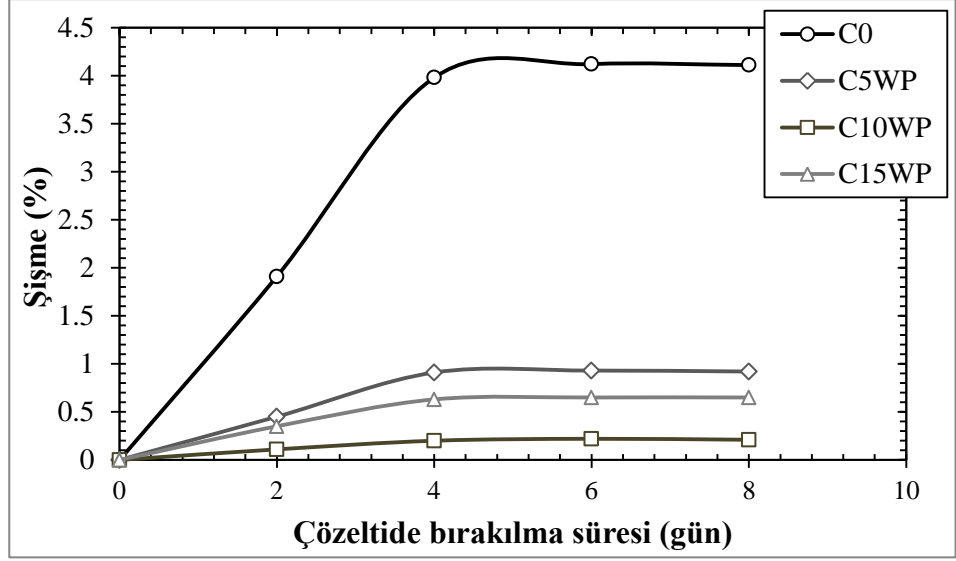
Örneklerin serbest düşey şişme değerleri Şekil 4.25- Şekil 4.27’de verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, hazırlanan üç farklı çözelti için maksimum şişme değerleri çimento içermeyen kaolin örneklerden elde edilmiştir. Ortamda bulunan alümina sebebiyle kaolin örneği diğer örneklere göre daha fazla şişme gösterdiği söylenebilmektedir. Mitchell ve Dermatas (1992), kaolin gibi alümina açısından zengin zeminlerde etrenjit oluşumunun montmorillonite kıyasla daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.



(a)



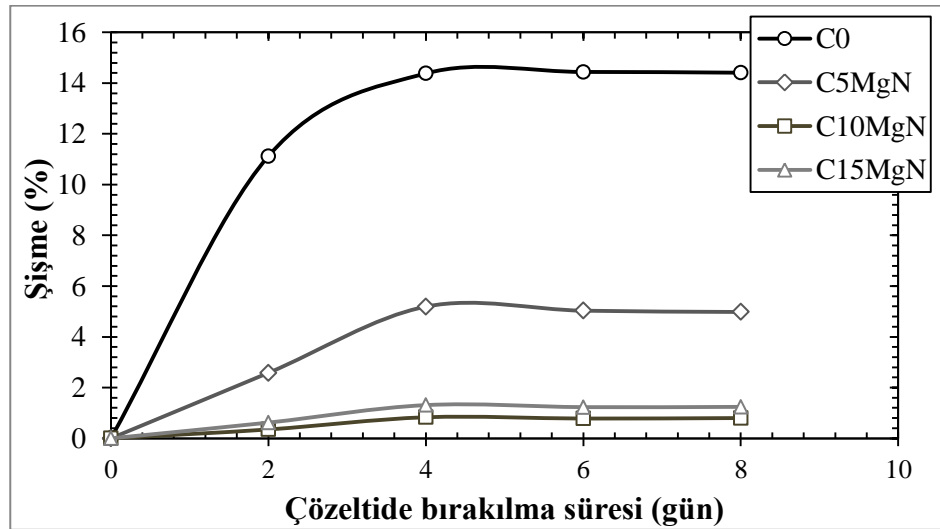
(b)



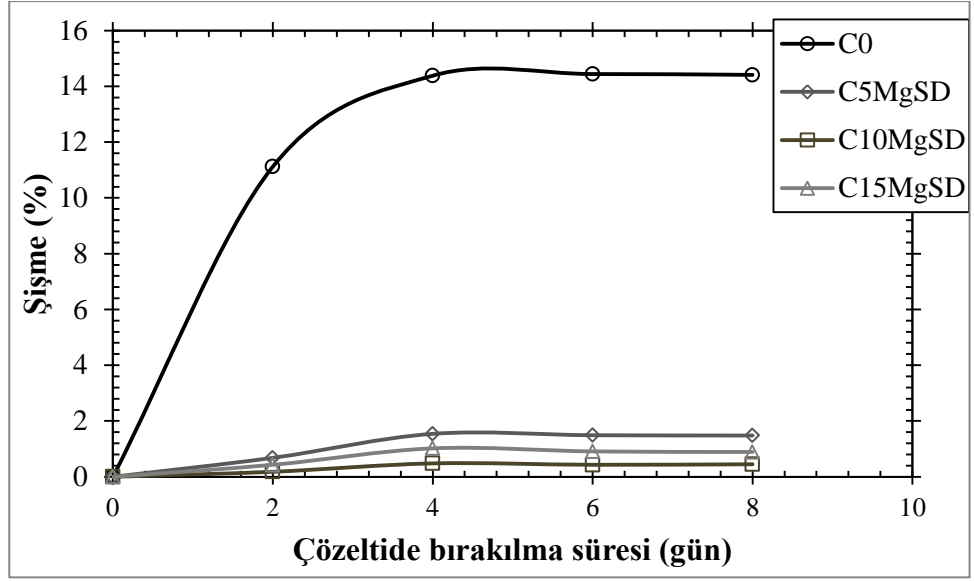
(c)

Şekil 4.25. Suda bırakılmış (a) normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (b) sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (c) puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri

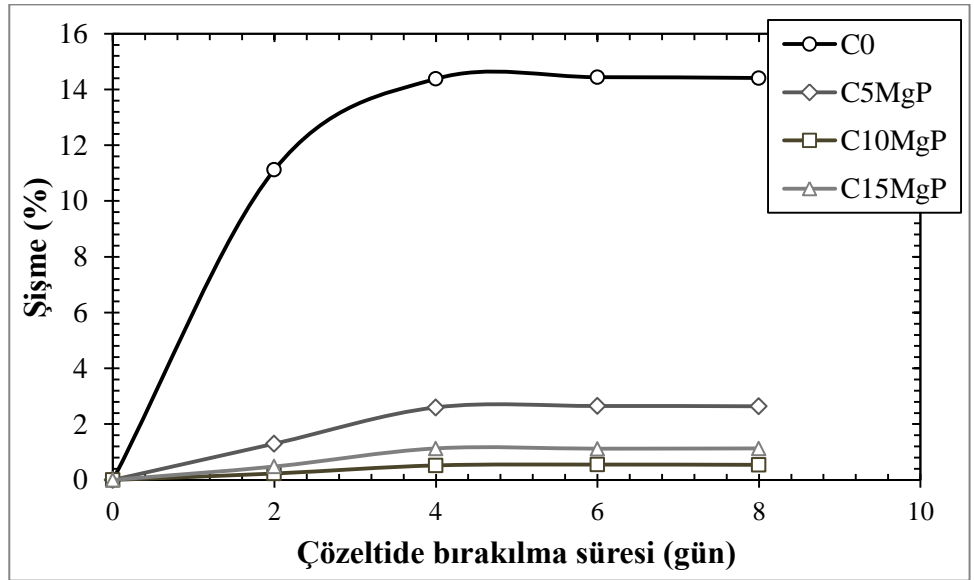
Şekil 4.25'te görüldüğü üzere, suda bekletilen örneklerden çimentosuz kaolin örnek 4 gün sonunda yaklaşık olarak %4 şişme göstermiştir. % 5 oranında çimento içeren örneklerde ise 4 gün sonunda gözlemlenen maksimum şişme miktarı ise % 2 olarak elde edilmiştir. %10 ve % 15 oranında çimento içeren örneklerde de sırası ile maksimum % 0.24 ve % 0.85 miktarda şişme gözlemlenmiştir. Çimento stabilizasyonu ile birlikte suda bekletilen örneklerin şişme miktarı yaklaşık olarak %50 ile % 95 arasında azalmıştır.



(a)

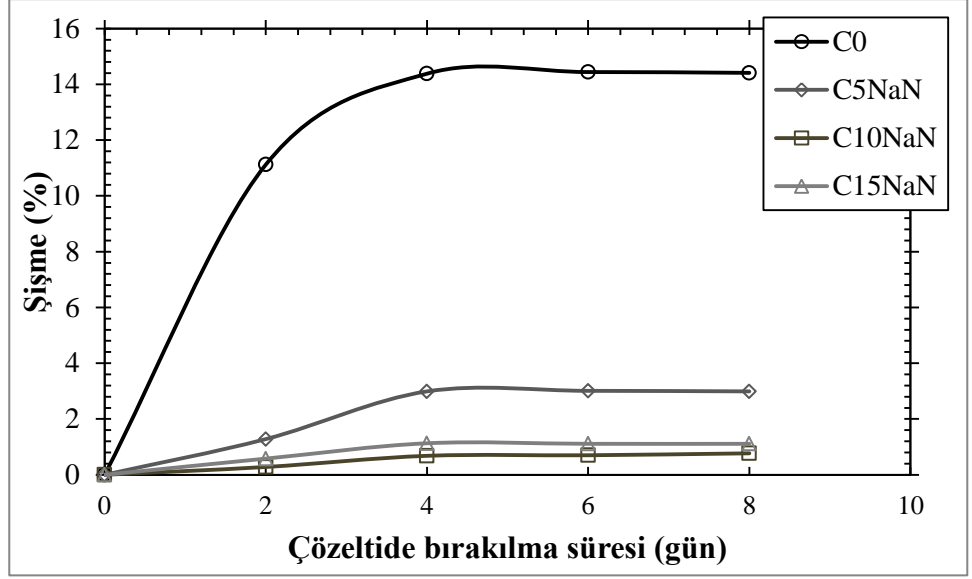


(b)

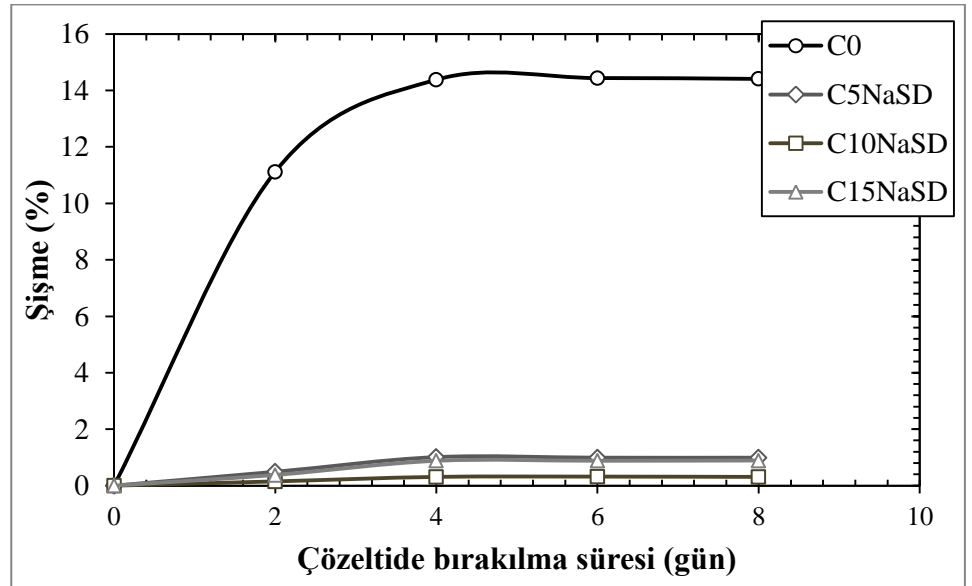


(c)

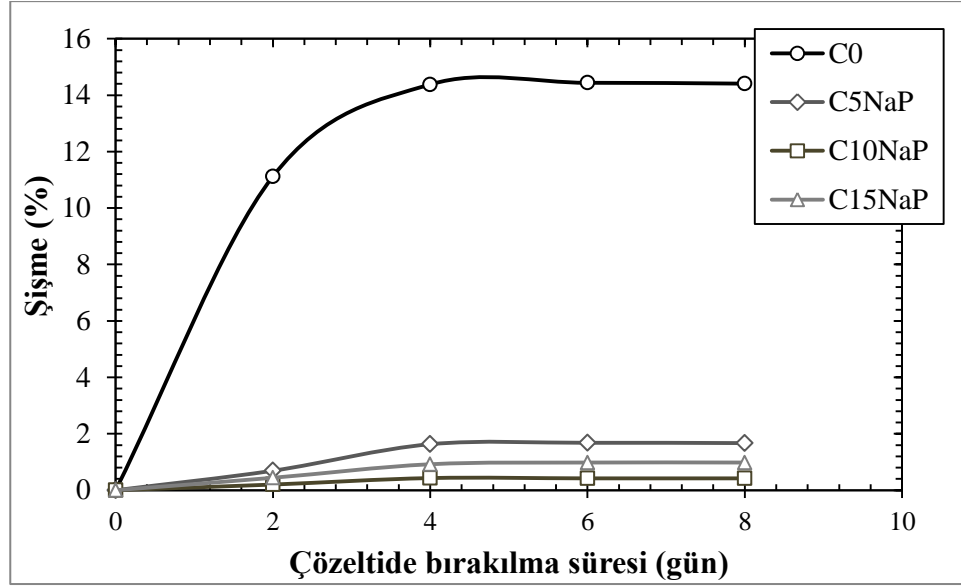
Şekil 4.26. Magnezyum sülfat çözeltisine bırakılmış (a) normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (b) sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (c) puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.27. Sodyum sülfat çözeltisine bırakılmış (a) normal Portland çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (b) sülfata dayanıklı çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri (c) puzolanik çimento ile hazırlanmış örneklerin şişme değerleri

Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen çimentosuz kaolin örnek için 4 gün sonundaki şişme miktarı hızla %14'e yükselmiştir. Öte yandan, magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen çimento stabilize örneklerin şişme değerleri yaklaşık olarak 7 kat azalmıştır. Bu durum, suda bekletilen örneklerle karşılaştırıldığında, sülfata maruz zeminlerin şişme değerlerinde çimento stabilizasyonun önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

Örneklerin bekletildiği çözelti ve su içerisindeki hacimsel deformasyon davranışları göz önüne alındığında, maksimum şişme %1 konsantrasyonuna sahip magnezyum sülfat çözeltisindeki örneklerde minimum şişme ise suda bekletilen örneklerde gözlemlenmiştir. Çimento içeren örnekler arasında, maksimum şişme değerleri normal portland çimentosu içeren örneklerde, minimum şişme değerleri ise sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde tespit edilmiştir. Örneğin, %1 konsantrasyonlu magnezyum çözeltisinde bekletilen, %5 portland çimento içeriğinde ve %5 sülfata dayanıklı çimento içeriğinde hazırlanan örneklerden 4 gün sonunda alınan ölçümler sonucu, portland çimento katkılı örneğin şişme miktarının 4 kat daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.26).

Çimentonun sistemde bulunmasıyla beraber, sistemin C_3A miktarındaki artışından dolayı sülfat saldırısı kaynaklı şişmenin artışı beklenilmektedir. Ancak,

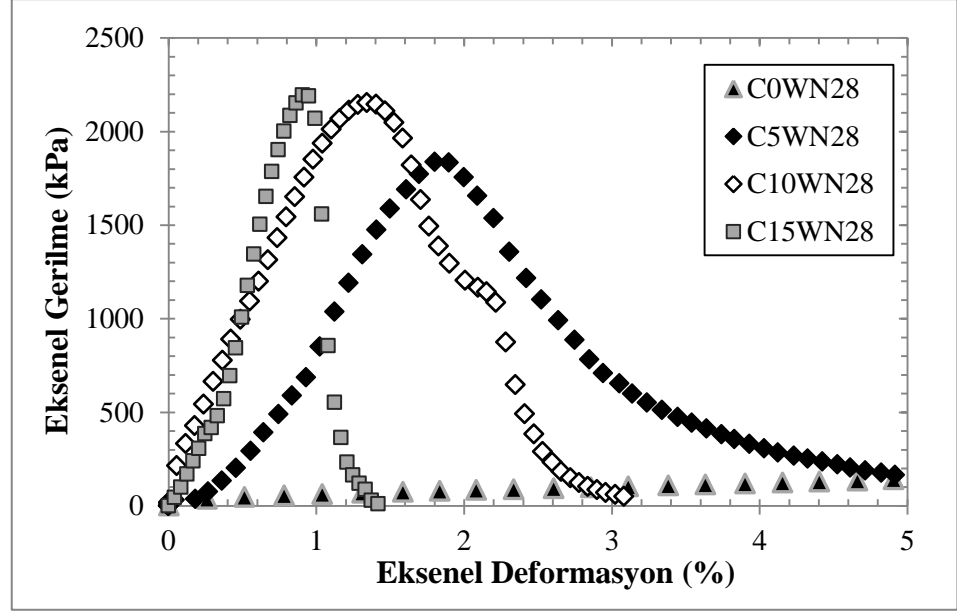
örneklerin çimento miktarının artışıyla çimento içermeyen örneklere göre şişme miktarı daha da azalmıştır. Bu durum, çimentonun sisteme verdiği bağlayıcılık özelliğinden dolayı örneklerin dayanımının arttırması ve örneklerin şişmeye karşı daha dirençli olması ile açıklanabilmektedir. Kaolin kilinin maksimum şişme değerine sahip olması bu olguyu kanıtlamaktadır. Ayrıca, deney sonuçlarında tüm örneklerin şişme sonuçları dikkate alındığında % 10 çimento içeriğinde minimum şişme miktarları elde edilmiştir. Dolayısıyla, % 10 çimento içeriğinin çimento ile stabilize edilen kaolin kili için şişmeye karşı optimum çimento içeriği olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 incelendiğinde, magnezyum sülfat çözeltisinin sodyum sülfat çözeltisine oranla daha fazla genişmeye neden olduğu görülmektedir. Magnezyum sülfat çözeltisi, sodyum sülfattan farklı olarak reaksiyonlar sonucu oluşan C-S-H bağlarının bozulmasına neden olmaktadır. Bağlayıcılık özelliğinin azalması ile birlikte örneklerin genişmeye karşı direnci azalmaktadır. Bu nedenle, magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerde sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler oranla daha fazla miktarlarda şişme meydana gelmiştir.

Sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerin şişme değerleri, puzolanik çimento içeren örneklere göre daha düşüktür. Sülfata dayanıklı çimento daha az miktarda C_3A içerdiğinden, C_3A -alçıtışı reaksiyon ürünü olan C-S-A' in daha az miktarda oluştuğu düşünülmektedir. Bu nedenle de sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde puzolanik çimenton içeren örneklere göre daha az şişme gözlemlenmektedir. Portland çimentosu içeren örneklerde ise maksimum şişme meydana gelmekte ve bu durum normal portland çimentosunun diğer çimentolara göre daha fazla miktarlarda C_3A içermesi ile açıklanabilmektedir.

4.2.7. Gerilme –deformasyon ilişkisinin incelenmesi

Çimento içeriğinin kil zeminin gerilme-deformasyon ilişkisi üzerindeki etkisi serbest basınç deneyi grafikleri incelenerek belirlenmiştir. Çimento içeriği maksimum aksenal gerilmeleri ve aksenal-deformasyon eğrilerini etkilemekte dolayısı ile gerilme-deformasyon eğrileri değişmektedir. Şekil 4.28'de %0, 5, 10 ve 15 çimento içeriğindeki örneklerin gerilme-deformasyon eğrileri verilmiştir.

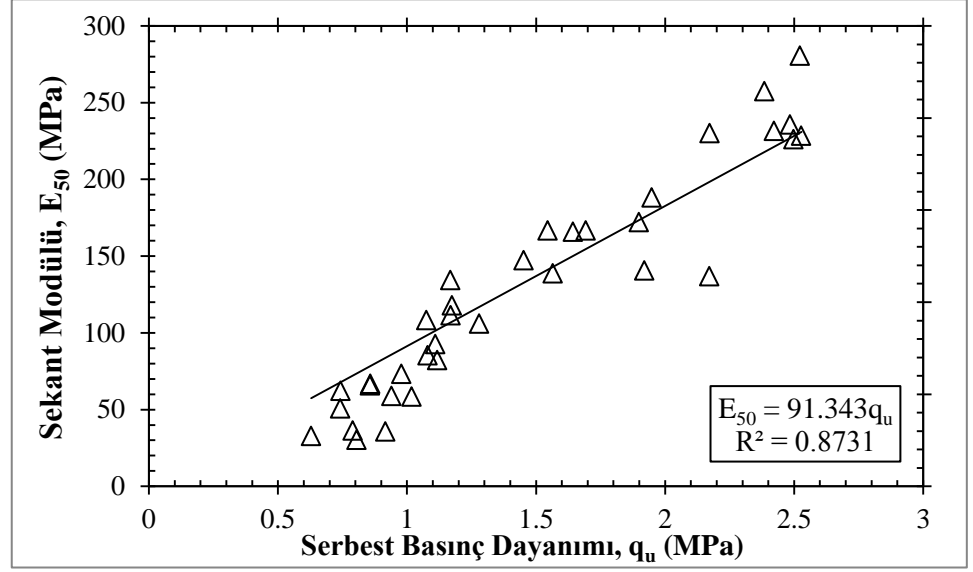


Şekil 4.28. Farklı oranlarda normal portland çimentosu içeren örneklerin aksel gerilme ve aksel deformasyon davranışları

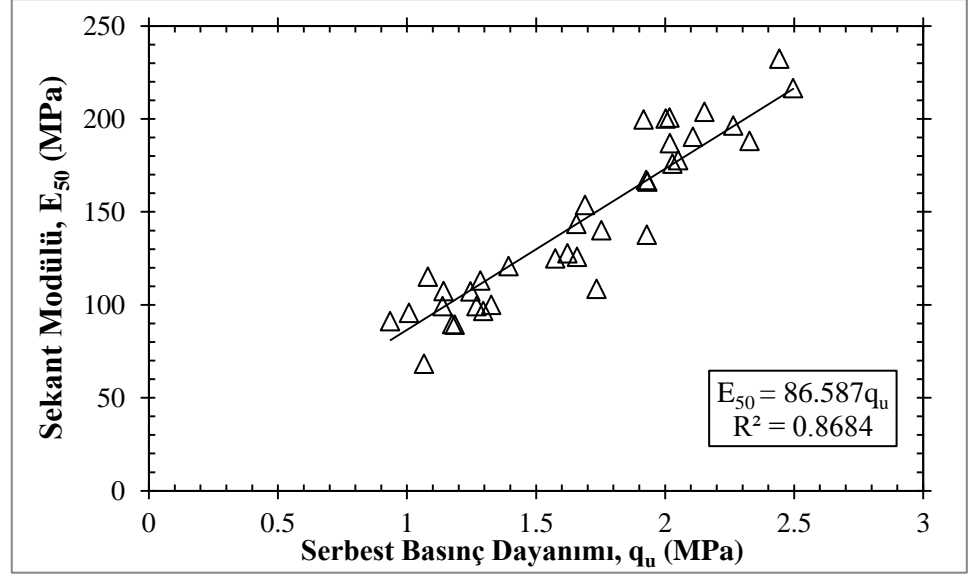
Şekil 4.28'de görüldüğü üzere saf kaolin kil örneği sünek davranış göstermektedir. Ancak, örneklere çimentonun eklenmesi ile birlikte oluşan C-S-H jelleri kaolin kilinin daha gevrek davranmasına neden olmaktadır. Çimento içeriği arttıkça örneklerin pik dayanımındaki deformasyon değerleri de azalmakta böylelikle örnekler daha gevrek davranış göstermektedirler.

Serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme-deformasyon grafiğinde bulunan serbest basınç dayanımının % 50'sine denk gelen gerilme deformasyon oranı olan sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasında lineer bir bağlantı bulunmaktadır (Lorenzo and Bergado, 2006). Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 'da deneysel çalışmada elde edilen aksel gerilme ve aksel deformasyon eğrilerinden hesaplanan sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişkiler verilmiştir. Hesaplanan verilerden ön çalışmada da olduğu üzere çimento içeriğinin artışı ile birlikte örneklerin sekant modüllerinde bir artış belirlenmiştir. Tahmin edileceği üzere en büyük sekant modülü değerleri en fazla çimento içeriğine ve kür süresine sahip örneklerde elde edilmiştir. Serbest basınç dayanımı ile sekant modülü arasında kuvvetli bir lineer ilişkinin olduğu literatürde pek çok çalışmada vurgulanmıştır (Kukko 2000), (Tang 2000), (Wang et al., 2013), (Zhu, 2005). Ancak, tez çalışması kapsamında sağlanan şartlar altındaki kil zeminler için literatürde herhangi bir korelasyon bulunmamaktadır. Deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılarak magnezyum sülfat çözeltisi ve sodyum sülfat çözeltisi içeren çimento stabilize kaolin kili için serbest basınç dayanımı ve sekant

modülü arasında çeşitli ilişkiler belirlenmiştir. Magnezyum sülfat içeren çimento stabilize kaolin için serbest basınç dayanımı ve sekant modülü arasındaki ilişki 0.8731 determinasyon katsayısı ile $E_{50} = 91.343q_u$ ilişkisi elde edilmiştir. Bu korelasyon ile magnezyum sülfat etkisi altındaki çimento stabilize kaolin kilinin serbest basınç dayanımı ve elastisite modülleri arasındaki ilişki öngörülebilmektedir. Sodyum sülfat içeren çimento stabilize kaolin için ise bu ilişki 0.8684 determinasyon katsayısı ile $E_{50} = 86.587q_u$ olarak belirlenmiştir.

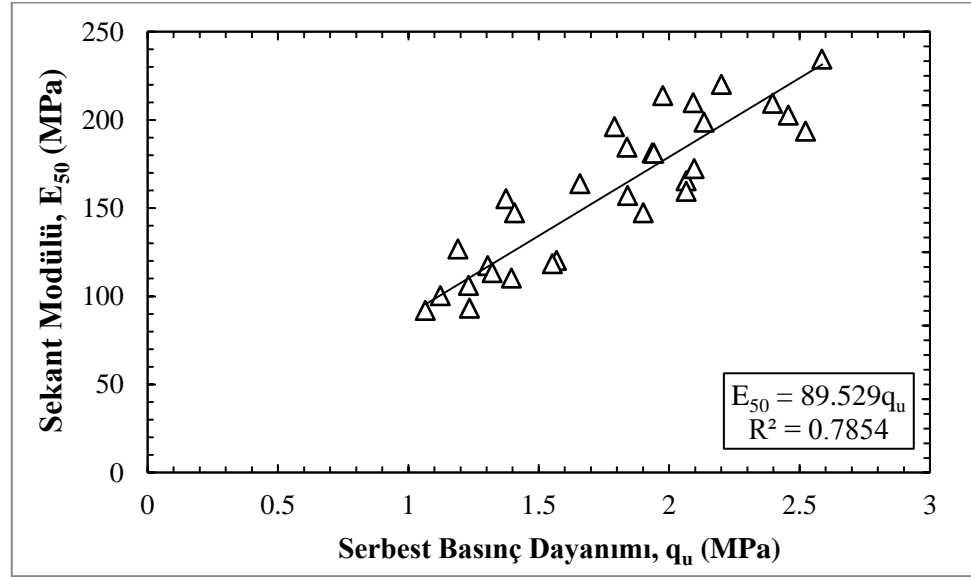


Şekil 4.29. Magnezyum Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.30. Sodyum Sülfat etkisi altındaki çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki

Sülfat içermeyen çimento stabilize kaolinin serbest basınç dayanımı ile sekant modülü arasındaki ilişki Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Çimento stabilize örneklerin sekant modülü ile serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki

5. Magnezyum sülfat çözeltisi içermeyen örneklerde çimento miktarını artışı ile birlikte klor-iyon geçirgenliği belirgin olarak azalmıştır. Çimento hidratasyonu sonucunda oluşan çimentomsu ürünler boşlukları doldurarak ve tıkayarak geçirgenliği azaltmıştır. Dolayısı ile kür süresinin ve çimento içeriğinin artışı geçirimsizliği azaltmaktadır. Erken dönemde (1 ve 7 gün) çimento ile kil arasındaki reaksiyonlar sonucu bağlayıcı özellikteki ürünler hızla oluştuğundan erken dönemde kür süresinin artışı ile birlikte geçirimsizlik belirgin olarak azalmakta ancak ilerleyen dönemlerde (28 – 90 gün) geçirimsizlik özelliklerinde kayda değer değişimler meydana gelmemiştir. Çimento tiplerinin performansları değerlendirildiğinde ise 7 günlük kür süresine kadar portland çimentosu içeren örneklerin geçirimsizliklerinin diğer çimento tiplerini içeren örneklere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Fakat 28 gün kür süresinde ise sülfata dayanıklı ve puzolanik çimento içeren örneklerin geçirimsizlikleri portland çimentosu içeren örneklere göre daha az olmaktadır. 28 günden sonra ise en düşük geçirimsizlik değeri sülfata dayanıklı çimento içeren örneklerde elde edilmiştir. Bu olgu, sülfata dayanıklı çimentonun daha az miktarda C_3A içermesi nedeni ile gerçekleşmektedir.

6. Çimento stabilizasyonunun şişme miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Optimum su içeriğinde, aynı oranda çimento ile hazırlanan örneklere farklı çözeltilerde kür uygulandığında maksimum şişme değeri magnezyum sülfat çözeltisinde beklenen örneklerden minimum şişme değeri ise suda beklenen örneklerden elde edilmiştir. Çimento içeren örneklerin şişme miktarında kür uygulamasının 4.gününe kadar ani artış gözlemlenmiştir ve şişme miktarı 4.günden itibaren sabit kalmıştır. Kaolin örneklerin şişme miktarında kür uygulamasının 6.gününe kadar artış gözlemlenmiştir ve şişme miktarı 6.günden itibaren sabit kalmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

ACI 230.1R, Report on Soil Cement, ACI Committee 230, 28 p.

ASTM C 109, 2013, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2 in. Or [50-mm] cube specimens, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM C 1202, 2012, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 422, 2007, Standard test method for particle-size analysis of soils, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 698, 2012, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m³)), The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 854, 2014, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 2166, 2007 Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 4318, 2010, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

ASTM D 4546, 2014, Standard test methods for one dimensional swell or collapse of soils, The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

Ahnberg, H., Ljungkrantz, C. and Holmqvist, L., 1995, Deep stabilization of different types of soft soils, Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7:167-172 pp.

Cement Deep Mixing Method Association, 1999, Cement Deep Mixing Method (CDM), Design and Construction Manual.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M. and Lee, F. H.**, 2004, Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7):696–706 pp.
- Cohen M. D.**, 1983, Theories of expansion in sulfoaluminate–type expansive cements: Schools of thought, *Cement and Concrete Research*, 13:809-818 pp.
- Enami, A., Yoshida, M., Hibino, S., Takahashi, M. and Akitani, K.**, 1985, In situ measurement of temperature in soil cement columns and influence of curing temperature on unconfined compressive strength of soil cement. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1737–1740 pp.
- Ghazavi, M. and Roustaei, M.**, 2010, The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, *Cold Regions Science and Technology*, 61(2-3):125–131 pp.
- Güllü, H. and Khudir, A.**, 2014, Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. *Cold Regions Science and Technology*, 106-107: 55–65 pp.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Suddeepong, A.**, 2011, Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay, *Construction and Building Materials*, 25(4):1521–1531 pp.
- Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M. D.**, 2012, Strength development in blended cement admixed saline clay, *Applied Clay Science*, 55: 44–52 pp.
- Inthrasombat, N.**, 2003, Ettringite Formation in Lime Treated Sulfate Soils: Verification by Mineralogical and Swell Testing, MSc. Thesis, The University of Texas at Arlington.
- Kalkan, E.**, 2009, Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw, *Cold Regions Science and Technology*, 58(3):130–135 pp.
- Kamruzzaman, A. H. M.**, 2002, Physico-chemical and engineering behavior of cement treated Singapore marine clay, PhD. Thesis, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 189 p.
- Kezdi A.**, 1979, *Stabilized Earth Roads, Development in Geotechnical Engineering*, Elsevier Scientific Publishing Company, 186 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kido, Y., Hishimoto, S., Hayashi, H. and Hashimoto, H.**, 2009, Effects of curing temperatures on the strength of cement-treated peat, Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization, 151–154 pp.
- Kitazume, M. and Terashi, M.**, 2013, The deep mixing method, CRC Press, London, 406 p.
- Kota, B.V.S., Hazlett, D. and Perrin, L.**, 1996, Sulfate-bearing soils: problems with calcium based stabilizers, Transportation Research Record, 1546,: 62-69 pp.
- Ksaibati K. and Huntington, G.S.**, 1996, Evaluation of sulfate expansion in soil-cements, Geotechnical Testing Journal, 19(3):269-276 pp.
- Kukko, H.**, 2000, Stabilization of clay with inorganic by-products, Journal of Materials in Civil Engineering, 12(4):307–309 pp.
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T.**, 2006, Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2), 161-174 pp.
- Mitchell, J.K.**, 1981, Soil improvement-state of the art report, Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 4:509-565 pp.
- Olgun, M.**, 2013, The effects and optimization of additives for expansive clays under freeze-thaw conditions, Cold Regions Science and Technology, 93:36–46 pp.
- Ouhadi, V. R., and Yong, R. N.**, 2008, Ettringite formation and behaviour in clayey soils, Applied Clay Science, 42(1-2): 258–265 pp.
- Porbaha, A., Shibuya, S. and Kishida, T.**, 2000, State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization, Ground Improvement, 4(3):91-110 pp.
- Saitoh, S., Niina, A. and Babasaki, R.**, 1980, Effect of curing temperature on the strength of treated soils and consideration on measurement of elastic module, Proceedings of the Symposium on Testing of treated Soils, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 61–66 pp.
- Saitoh, S.**, 1988, Experimental study of engineering properties of cement improved ground by the deep mixing method, PhD. thesis, Nihon University, 317 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sariosseiri, F. and Muhunthan, B.**, 2009, Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, *Engineering Geology*, 104(1-2):119–125 pp.
- Schaefer, V.R., Abramson, L.W., Drumheller, J.C. and Sharp, K.D.**, 1997, Ground Improvement, ground reinforcement and ground treatment: Developments 1987-1997, Geotechnical Special Publication, ASCE, 69 p.
- Sherwood P.T.**, 1958, Effect of sulfates on Cement-Stabilized clay, *Highway Research Board Bulletin*, 193:45-54 pp.
- Shibi, T. and Kamei, T.**, 2014, Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash, *Cold Regions Science and Technology*, 106-107:36–45 pp.
- Taki, O. and Yang, D.**, 1991, Soil cement mixed wall technique, *Geotechnical Engineering Congress*, ASCE, New York, Special Publication, 27: 203-298 pp.
- Tang, Y., Liu, H. and Zhu, W.**, 2000, Study on engineering properties of cement-stabilized soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 22 (5):549–554 pp.
- Taylor, H.F.W.**, 1997, *Cement Chemistry* 2nd edition, Thomas Telford Edition Published, London.
- Uddin, K., Balasubramaniam, A.S. and Bergado, D.T.**, 1997, Engineering behavior of cement -treated Bangkok soft clay, *Geotechnical Engineering*, 28(1):89-119 pp.
- Wang L.**, 2002, Cementitious stabilization of soils in the pesence of sulfate, Ph.D. Thesis, Louisiana State University, 111 p.
- Wang L., Roy, A., Seals R.K. and Byerly Z.**, 2005, Suppression of sulfate attack on a stabilized soil, *Journal of American Ceramics Society*, 88(6):1600–1606 pp.
- Wang, D., Abriak, N. and Zentar, R.**, 2013, Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash, *Engineering Geology*, 166:90–99 pp.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E. And Akbulut, S.**, 2007, Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives, *Cold Regions Science and Technology*, 48(1):44–54 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhu,W., Zhang, C., Gao, Y. and Fan, Z., 2005, Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment. Journal of Zhejiang University, 39(10):1561–1565 pp.

ÖZGEÇMİŞ

İrem Kalıpcılar, 1987 yılında İzmir’de doğdu. Lise öğrenimini Çiğli Milli Piyango Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra, 2012 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2013 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olan yazar yüksek lisans eğitimine de aynı bölümde devam etmektedir.