

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE SU MUHTEVASININ
ETKİSİ

Taha Coşkun TATLI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Dr. Öğr. Üyesi Kaan YÜNKÜL
Doç. Dr. Harun AKOĞUZ
Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Taha Coşkun Tatlı]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK danışmanlığında, Taha Coşkun TATLI tarafından hazırlanan bu çalışma 21/04/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans olarak kabul oybirliği/oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Kaan YÜNKÜL İmza:

Üye : Doç. Dr. Harun AKOĞUZ İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans/Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Killi Zeminlerin Kireç ile İyileştirilmesinde Su Muhtevasının Etkisi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu ęalıřmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu ęalıřmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 21/04/2026

(İmza)

Taha Coşkun TATLI

ÖZET

KİLLİ ZEMİNLERİN KİREÇ İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE SU MUHTEVASININ ETKİSİ

Taha Coşkun TATLI

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

2026, __ sayfa

Bu tez çalışması, günümüzde kullanımı yaygınlaşan kireç ile zemin iyileştirme yönteminin en önemli etken maddelerinden olan su muhtevasının etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. Çalışmada düşük plastisiteli bir kilin kireç ile iyileştirmesinde su muhtevasının etkileri incelenmiştir. Erzincan ilinden temin edilen kil numunelerine su ilave edilerek elde edilen %12, %14, %16, %18, %21 ve %24 başlangıç su muhtevalarına sahip numunelere farklı oranlarda sönmüş kireç eklenmiş, desikatörde bekletilen 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük numunelerin serbest basınç deney sonuçları incelenmiştir. Aynı zamanda kireç ile iyileştirme sonrasında numunelerin başlangıç su muhtevasına göre değişimi elde edilmiştir. Serbest basınç deneyleri incelendiğinde tüm numunelerde kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı, göçme deformasyonunda azalma olduğu ve aynı su muhtevasındaki numunelere kireç oranı arttırıldıkça serbest basınç mukavemetin arttığı, su muhtevasının azaldığı tespit edilmiştir. Zeminin plastik limit sınırına yakın su muhtevalarında sönmüş kireç ile yapılan kireç stabilizasyonunda %4 veya %6 gibi kireç oranı ile dayanımda artışın 6-8 kat civarında artış olduğu bu uygulamalarının sahada da verimli sonuçlar oluşturacağı öngörülmektedir. Su muhtevasının artması ile likit limit civarına doğru zeminde yapılan kireç katkısı ile dayanımın arttığı ancak istenilen seviyelerde olmadığı, yüksek su muhtevalarında kireç stabilizasyonunun sönmemiş kireç ile yapılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kil, kireç, serbest basınç mukavemeti

ABSTRACT

THE EFFECT OF WATER CONTENT ON THE STABILIZATION OF CLAYEY SOILS WITH LIME

Taha Coşkun TATLI

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

2026, __ pages

This thesis investigates the effect of water content, one of the most important factors influencing the widely used lime stabilization method for soil improvement. The study examines the effects of water content on the lime stabilization of a low-plasticity clay. Clay samples obtained from Erzincan Province were prepared with initial water contents of 12%, 14%, 16%, 18%, 21%, and 24% by adding water. Different proportions of hydrated lime were then added to these samples, and the unconfined compressive strength test results of specimens cured in a desiccator for 7, 28, and 91 days were evaluated. In addition, changes in the water content of the samples after lime stabilization were determined with respect to their initial water contents.

The results of the unconfined compressive strength tests indicated that, for all samples, increasing the curing period led to an increase in unconfined compressive strength and a decrease in failure strain. Furthermore, for samples with the same water content, increasing the lime content resulted in higher unconfined compressive strength and lower water content. It was determined that lime stabilization using hydrated lime at water contents close to the plastic limit of the soil produced approximately a six- to eight-fold increase in strength when lime contents of 4% or 6% were used. Therefore, such applications are expected to yield efficient and effective results in field conditions as well.

As the water content increased toward the liquid limit, the addition of lime still improved the strength of the soil; however, the improvement did not reach the desired levels. Consequently, it is considered that, at high water contents, lime stabilization using quicklime rather than hydrated lime would be a more suitable approach.

Keywords: Clay, slaked lime, unconfined compressive strength.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışma konusu belirlenmesinden ve çalışmamın sonuna kadar her koşulda bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, eksiklerimi fark etmem için gerekli desteği veren ve onları düzeltmem hususunda sabırla yanımda olan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK'a ve desteklerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Harun AKOĞUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini ve varlığını hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim MERVE TATLI'ya teşekkürlerin en büyüğünü sunarım.

Taha Coşkun TATLI

Nisan, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri	2
2.1.1.Mekanik zemin iyileştirilmesi	3
2.1.2.Kimyasal zemin iyileştirilmesi	6
2.2.Kireç İle Zemin İyileştirilmesi	9
2.2.1.Kireç türleri ve uygulanabilirliği	9
2.2.2.Kireç stabilizasyonunun kimyası.....	10
2.2.3.Kireç stabilizasyonunun geoteknik özelliklere etkisi	11
2.2.4.Kireç stabilizasyonunda serbest basınç deneyi ve kür süresinin etkisi	12
2.2.5. Kireç ile iyileştirme yönteminin arazide uygulanabilirliği.....	13
2.3. Su Muhtevasının Etkisi.....	16
2.4. Kireç Stabilizasyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Malzeme	21
3.1.1. Zemin.....	21
3.1.2.Kireç	22
3.2 Deneysel Program	23
3.3 Numune Hazırlanması	24

3.4 Deneyleer.....	28
3.4.1 Elek analizi	28
3.4.2 Kıvıam limit deneyi	29
3.4.3 Serbest basınç deneyi.....	31
4.ARAŞTIRMA BULGULARI	33
4.1. w= %12 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	33
4.2. w= %14 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	36
4.3. w= %16 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	40
4.4. w= %18 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	43
4.5. w= %21 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	47
4.6. w= %24 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)	50
4.7. Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deney Sonuçları	53
4.8. Numunelerin Deney Öncesi ve Sonrası Verileri	54
4.9. Numunelerin Serbest Basınç Deneyi Fotoları	57
5.SONUÇLAR.....	64
KAYNAKÇA	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1: Kil numunesinin özellikleri.....	22
Tablo 3.2: Kirecin kimyasal özellikleri	23
Tablo 3.3: Su muhtevası ve kireç oranları	24
Tablo 3.4: Likit limit konu batma deney sonuçları	30
Tablo 3.5: Plastik limit deney sonuçları	31
Tablo 4.1: Numunelerin deney öncesi ve sonrası verileri	54
Tablo 4.2: 7 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları	58
Tablo 4.3: 28 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları	60
Tablo 4.4: 91 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Dinamik kompaksiyon metodu.....	4
Şekil 2.2: Vibro Kompaksiyon yönteminin uygulama şeması.....	4
Şekil 2.3: Dipten beslemeli kuru Vibro- yer değiştirme yöntemi.....	5
Şekil 2.5: Zemin – çimento enjeksiyonu.....	7
Şekil 2.6: Süper Jet Yöntemi Şeması.....	8
Şekil 2.7: Derin zemin karıştırma.....	8
Şekil 2.8: Kirece bağlı olarak Atterberg limitlerinde ki değişim.....	11
Şekil 2.9: Zemine kireç eklenmesi.....	14
Şekil 2.10: Zemin ile kirecin karıştırılması.....	14
Şekil 2.11: Keçi ayaklı silindir ile zemin sıkıştırılması.....	14
Şekil 2.12: Zemine arasöz ile su ilavesi.....	15
Şekil 2.13: Zeminin karıştırılması ve düzeltilmesi.....	15
Şekil 2.14: Zeminin titreşimli silindir ile düzeltilmesi.....	16
Şekil 2.15: Zemin iyileştirme sahası genel görünüm (İstanbul 2025).....	16
Şekil 3.3: Kil numunesine su ve kireç eklenmesi.....	25
Şekil 3.4: Numune hazırlama aşamaları.....	26
Şekil 3.6: Desikatörde numune muhafazası.....	27
Şekil 3.7: Islak elek analizi.....	28
Şekil 3.8: Koni batma deney aleti.....	29
Şekil 4.1: $w=12$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	33
Şekil 4.2: $w=12$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	34
Şekil 4.3: $w=12$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	34
Şekil 4.4: 12 su muhtevalı 6 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı...35	
Şekil 4.5: 12 su muhtevalı 8 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı...35	
Şekil 4.6: 12 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	36
Şekil 4.7: $w=14$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	37
Şekil 4.8: $w=14$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	37
Şekil 4.9: $w=14$ olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	38
Şekil 4.10: 14 su muhtevalı 6 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı.38	
Şekil 4.11: 14 su muhtevalı 10 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı.....	39
Şekil 4.12: 14 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	39

Şekil 4.13: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	40
Şekil 4.14: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	41
Şekil 4.15: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	41
Şekil 4.16: %16 su muhtevalı %8 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı.	42
Şekil 4.17: %16 su muhtevalı %10 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı	42
Şekil 4.18: %16 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	43
Şekil 4.19: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	44
Şekil 4.20: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	44
Şekil 4.21: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	45
Şekil 4.22: %18 su muhtevalı %9 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı.	45
Şekil 4.23: %18 su muhtevalı %12 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı	46
Şekil 4.24: %18 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	46
Şekil 4.25: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	47
Şekil 4.26: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	48
Şekil 4.27: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	48
Şekil 4.28: %21 su muhtevalı %16 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı	49
Şekil 4.29: %21 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	49
Şekil 4.30: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı.....	50
Şekil 4.31: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı.....	51
Şekil 4.32: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı.....	51
Şekil 4.33: %24 su muhtevalı %25 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı	52
Şekil 4.34: %24 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları.....	52
Şekil 4.35: UCS değerleri karşılaştırmalı	53
Şekil 4.36: UCS değerleri karşılaştırmalı	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
μm	Mikron
D	Numune Çapı
H	Numune Yüksekliği
I_p	Plastisite İndisi
ϵ	Birim Deformasyon

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Eyalet Karayolu Ve Ulaştırma Görevlileri Birliği
ASTM	Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine Göre
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CBR	Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı
KGM	Kara Yolları Genel Müdürlüğü
LL	Likit Limit
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
Ppm	Milyonda Bir Birim
UCS	Serbest Basınç Dayanımı
USCS	Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi
XRD	X-Işını Difraktometresi
ICP-MS	İndüktüf Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinin en kapsamlı alanını oluşturan zemin; yollar, binalar, başka yapıların temelini oluşturabilirken veya zemin ile yapı oluşturulurken (ör. toprak barajı) zeminin belirli özellikleri taşınması istenir. Günümüzde projenin konumu gerekçesiyle problemlili zemin sahasının terk edilememesi, terk edilen problemlili zemin sahalarının çok olması ve problemlili zeminin taşınıp yerine istenilen özellikte zemin taşınması işlemlerinin ekonomik olmaması gibi nedenler ile zemin iyileştirme yöntemleri mühendislik açısından önemli uygulamalardır. Geçmişteki topluluklardan beri zemin farklı yöntemler ile iyileştirme yapılmıştır. İyileştirme yöntemlerinden katkı kireç maddesi eski uygarlıklardan beri kullanılmıştır.

Ülkemizde kireç ile zemin iyileştirilmesinin uygulanabilirliği ile ilgili tarafımda yapılan araştırmalarda kullanımın son 10 yıl içerisinde arttığı özellikle büyük şehirlerde ve tez içeriğinde örnekleri sunulan mega projelerde uygulandığı gerek ekonomik olması gerek mevcut zemini iyileştirerek çevreci olması istenilen özelliklerde zemin elde edilebilmesi gerekçeleriyle kullanımı ülkemizde arttığı ve artmaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında araştırılan zemin iyileştirme yöntemlerinden kireç katkı maddesinin, ülkemizde son yıllarda sıkça kullanılmasının yaygınlaşmış olup bu konuda yapılan akademik çalışmaların sayısı artmıştır. Ancak yapılan çalışmalar genellikle kireç oranı ve diğer katkı maddeleri ile birlikte kirecin kullanılması vb. konular üzerinedir. Bu tez çalışmasında kireç katkı maddesi ile yapılan iyileştirme yönteminin en önemli parametrelerinden olan su muhtevasının iyileştirmeye etkisi üzerinde çalışma yapılmıştır.

Çalışma kapsamında gerekli kil numunesi Erzincan bölgesinden temin edilmiştir. Temin edilen kil numuneleri üzerinde yapılan deneyler Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında yapılmıştır. Farklı su muhtevalarına sahip numuneler üzerinde farklı kireç oranları eklenerek meydana gelen değişiklikler karşılaştırılmıştır. Numuneler 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük olarak hazırlanmış, kür süresinin etkisi araştırılmıştır.

2.KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde zemin iyileştirme yöntemleri, kireç ile zemin iyileştirilmesi, su muhtevasının kireçle iyileştirmeye etkisi ve kireç iyileştirme ile ilgili yapılan akademik çalışmalar alt başlıklarıyla birlikte incelenmiştir. Konu elde edilen şekillerle desteklenmiştir.

2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

İnşaat mühendisliği çalışmalarında proje alanında karşılaşılan zeminler, çoğu zaman mühendislik açısından beklenen değerlere sahip değildir. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde alanlardaki mevcut zemin tabakaları, taşıma kapasitesi düşük, sıkışılabilir veya hidrolik geçirgenliğine sahip olabilir. Bu tür durumlarda çözüm olarak düşünülen yöntemlerden ilki yapının yerinin değiştirilmesidir. Ancak geoteknik ölçütler dışındaki sebepler yapının yerini belirlemekte ve hâlihazırdaki zemin tabakasında yapım gerçekleştirmektedir. Bu tarz durumlar sahadaki zemin tabakalarının iyileştirilmesi ile çözüme kavuşturulur. Çözüm için ideal yöntem projenin şartlarıyla belirlenecektir. (Holtz ve Kovacs 2002)

Saha fizibilite etüdünün yapılması bir inşaat mühendisliği projesi açısından uygulama öncesi yapılacak en temel unsurlardan birisidir. Bu etüt, çoğunlukla proje çizimine başlamadan önce, yapının yerini belirlemek üzere zemininin özelliklerini elde etmek amacıyla gerçekleştirilir. Yapının yerinin belirlenme aşamasında dikkat edilecek unsurların başında, yapının yükü ile işlevi, seçilecek temel çeşidi ve zemininin taşıma kapasitesi gelir. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

Geçmişte, zemin taşıma kapasitesi projenin yerini belirlemede büyük etken olmuştur. Zeminin taşıma kapasitesi yetersiz olması halinde yapının mevcut koşullarına uygun şekilde değiştirilmesi, mevcut zeminin çıkarma, taşıma ve değiştirme ile alandan vazgeçilmesi başlıca seçenekler arasındadır. Böyle durumlar ile, zemin taşıma kapasitesi istenilen değerde olmaması sebebiyle terk edilen alanlar önemli ölçüde sayısı çoğaldığından, arazi kıtlığı çok önemli bir sorun olmuştur. Heyelan olayı gerçekleşmiş ve kirlenmiş araziler ile terk edilen alanlar arasında; sınılaşma riski oluşabilecek zemin ile yumuşak kil ve organik zemin içeren zeminler önde gelmektedir. İnşaat mühendisliği projesinde, zeminde iyileştirme yapılmadan

istenilen geoteknik özelliklerde zemin sahası elde etmek oldukça zordur. Bahse konu yöntem, yapı tasarım standartlarındaki istenilen değerleri elde etmek üzere taşıma gücü yetersiz ve sorunlu zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Yapılan yenilikçi çalışmalar ile, inşaat mühendisliği ihtiyacına göre yumuşak kil ve organik toprak içeren zeminler iyileştirilebilmektedir. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

Tabii zemini yerinde iyileştirmede uygulanabilecek başlıca yöntemler şunlardır: Mekanik İyileştirme yöntemi zeminin yapısını değiştirmeden fiziksel açıdan yapılan farklı sıkıştırma (kompaksiyon) tekniklerini kapsamaktadır. Hidrolik yöntemler ise yeraltı su seviyesinin kontrolü, zemin suyunun uzaklaştırılması (drenaj) uygulamaları, zemin suyunun çıkarılması (konsolidasyon) işlemlerini içermektedir. Kimyasal yöntemler ile katkı malzemelerinin kullanımı, enjeksiyon uygulamaları gibi zeminin yapısını değişen yöntemleri kapsamaktadır. Bunlara ek olarak zemine hafif malzemelerin, çelik veya geosentetik donatı vb. malzemelerin eklenmesi ile iyileştirme yöntemlerinden bazılarıdır. Bu yöntemlerin bir kısmı tek tip zemin için uygulanabilirken, bir kısmı da farklı tip zeminlerde uygulanabilmektedir. (Özaydın 2011)

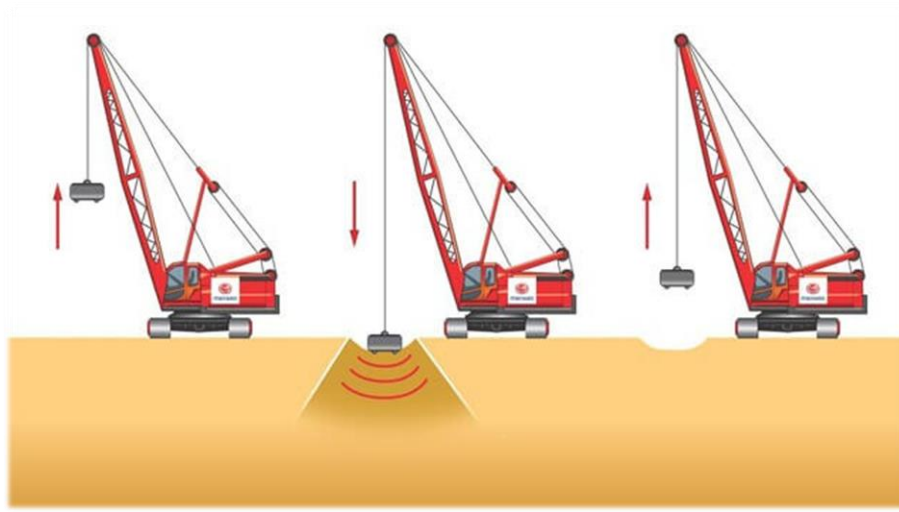
Zemin iyileştirme yöntemleri arasında mekanik veya kimyasal yöntemler ile birlikte zemin yapısına bağlı olarak termal veya elektriksel iyileştirme yöntemleri ile de yapılabilmektedir. Mekanik iyileştirme, zemini sıkıştırma ya da diğer adı ile kompaksiyon yöntemidir. Kimyasal iyileştirme, kimyasal maddelerin (Portland çimentosu, kireç, asfalt ya da kalsiyum klorür gibi) zemine enjekte edilmesi ya da karıştırılma yöntemidir. (Holtz vd.2002)

2.1.1.Mekanik zemin iyileştirilmesi

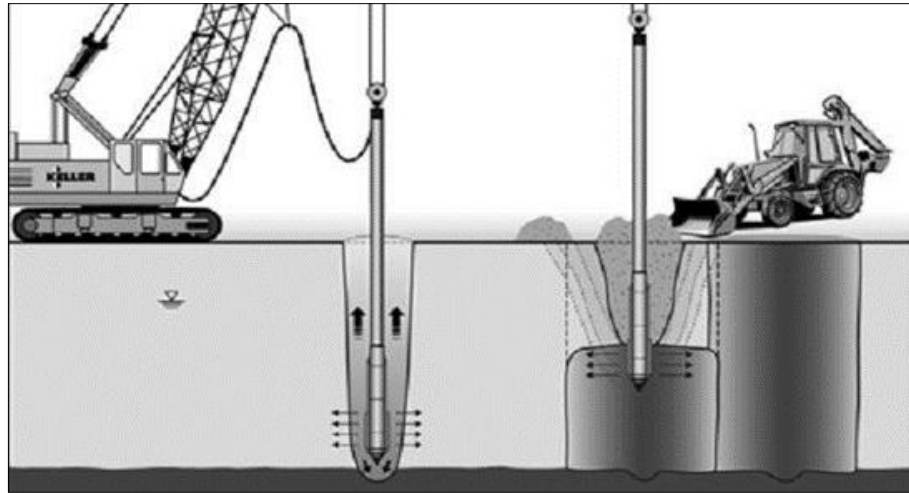
Mekanik iyileştirme yöntemi, tabii zemin tanelerinin titreşim veya sıkıştırma yoluyla fiziksel yapısını değiştirerek veya bariyerler ve çiviler gibi diğer fiziksel unsurları zemin içerisine yerleştirerek yapılır. Mekanik iyileştirme yöntemini, bir zemine farklı tane dağılımına sahip başka zeminin eklenmesi veya karıştırılarak değiştirilmesi yoluyla da gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu yöntemle ilk zemine göre daha yoğun zemin elde edilebilir. Silt veya kil gibi ince malzemeler içeren zeminin az miktarda ilavesiyle kohezyonsuz zeminlerdeki iri taneler

arası bağ sağlanarak zemin taşıma kapasitesi artırılabilir. Diğer yandan, iri ve köşeli kum ve çakıl taneleri, yeni zeminin içsel sürtünmesini artırarak sıkıştırılabilirliğini azaltır. Zeminleri iyileştirmek için yüksek çekme dayanım özellikli doğal veya sentetik doğal lifler, donatı çubukları, geosentetik şeritler, geotekstiller veya geogridler gibi etken maddelerinin kullanılması mekanik iyileştirme yöntemlerinden birisidir. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

Mekanik iyileştirme yönteminden kompaksiyon metodu; statik, dinamik, vibro (titreşimli) ve darbeli teknikler ile farklı tipte silindir veya farklı makinelerin kullanıldığı yüzeysel ve derin sıkıştırma uygulamaları şeklinde gerçekleştirilmektedir.

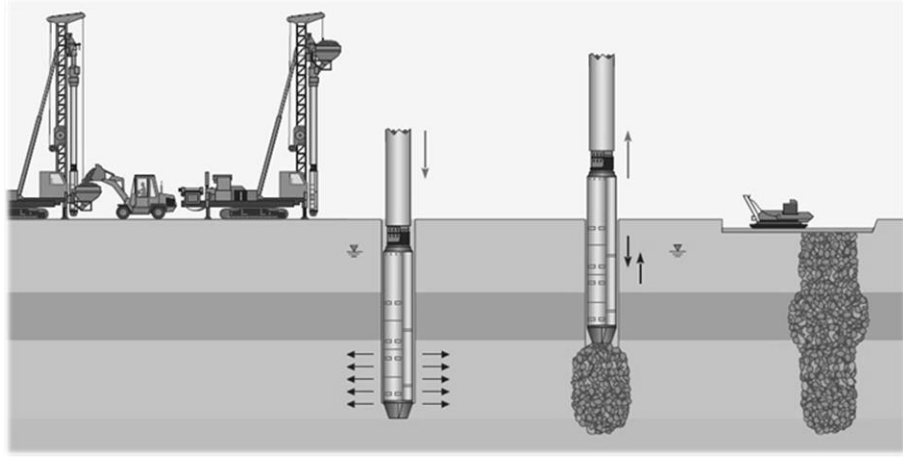


Şekil 2.1: Dinamik kompaksiyon metodu. (Volkan Atabey)



Şekil 2.2: Vibro Kompaksiyon yönteminin uygulama şeması. (Raju ve Sondermann, 2005)

Vibro kompaksiyon yöntemi kohezyonsuz zeminlerde uygulanarak, zeminin katmanlarını iyileştirilmekte ve tabii zemine kıyasla yoğunluğu ve mukavemeti artmış, sıkışabilirliği azalmış bir zemin kütlesi elde edilmektedir. Taş kolon veya Vibro-yer değiştirme adıyla bilinen yöntemde kohezyonlu zemin içerisinde vibratör yardımıyla oluşturulan bir boşluğa istenilen özellikleri taşıyan granüler malzeme eklenerek sıkıştırılmaktadır. Ancak uygulama noktaları arasında dikkate değer bir sıkışma elde edilememektedir. Sonuç olarak mevcut zemin ve oluşturulan rijit kolonlar ile kompozit bir zemin yapımı sağlanarak iyileştirme yapılır. (Erol, 2016)



Şekil 2.3: Dipten beslemeli kuru Vibro- yer değiştirme yöntemi (Raju ve Sondermann, 2005)

Yüzey kompaksiyon için kullanılan silindirik geleneksel makineler genel olarak şunlardır:

- Düz ayaklı silindirler
- Lastik tekerlekli silindirler
- Keçi ayaklı silindirler
- Titreşimli silindirler
- Darbeli sıkıştırma araçları
- Demir bandajlı silindirler
- Pnömatik silindirler



Şekil 2.4: Yüzey kompaksiyon yönteminden keçi ayaklı silindir (www.sanalşantiye.com)

2.1.2. Kimyasal zemin iyileştirilmesi

Kimyasal iyileştirme yöntemi, doğal zeminlerin geoteknik özelliklerini istenen mühendislik kriterlerinin sağlanması için uygulanan bir yöntemdir. Zeminin geoteknik ve indeks özellikleri, kesme mukavemeti parametrelerinin iyileştirilmesiyle, zemin taşıma kapasitesinin artırılmasıyla ve rijitliğin yükseltilmesiyle geliştirilebilir. Bu yöntemde zeminlere eklenince aktif olacak kimyasal malzemeler eklenerek zeminin stabilizesini arttırmak veya korumak amaçlanır. Kimyasal zemin iyileştirilmesi, çimentolu bir malzeme olan stabilizatör ile puzolanik maddeler içeren zemin mineralleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sayesinde şişen killerden granüler malzemelere kadar çok çeşitli tipte taban zeminlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir. Kimyasal iyileştirme yönteminin faydaları zemin taşıma gücünde artma indeks özelliklerinden plastisite de azalma, daha düşük geçirgenlik, üst yapı kalınlığının azalması, kazı malzemelerinin kaldırılmasının veya taşınmasının önlenmesi sayılabilir. Diğer bir sorunlu zemin olan şişen veya ince taneli zeminlerin nem içeriğine bağlı olarak hacimsel değişiklikleri azaltarak ve taşıma kapasitesini artırır. Kimyasal zemin iyileştirme yöntemi, uygun maliyetli olması, uygulanabilirliği ile performans açısından verimli ve çevreci yöntem olarak kabul edilir. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

Kimyasal iyileştirme yönteminde stabilize edici maddeler;

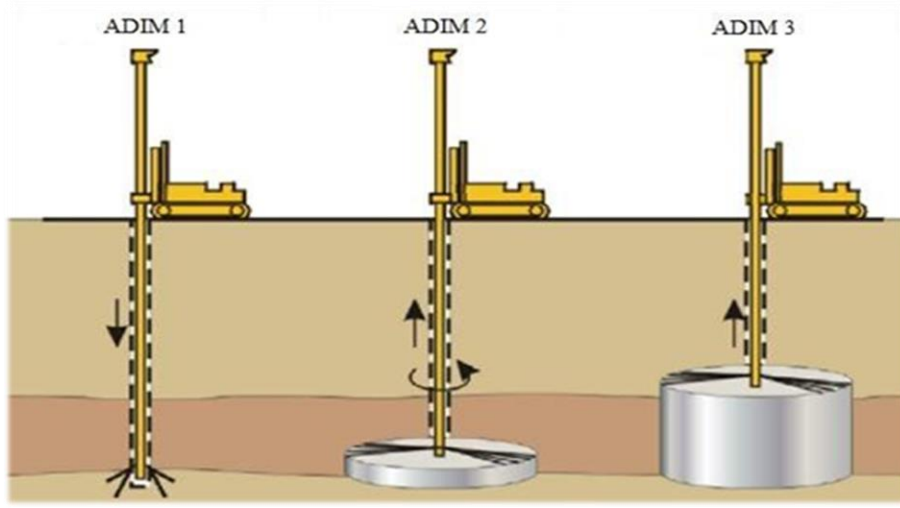
- Kireç,
- Çimento,
- Uçucu kül,
- Bitüm,
- Silis dumanı,
- Pirinç kabuğu külü veya bunların kombinasyonu olan çimentolu malzemelerin eklenmesiyle oluşan etkileşim ile zeminin iyileştirilmesidir. Stabilize edilmiş zeminler, tabii zemine göre yüksek dayanımlı, düşük geçirgenliğe ve daha düşük sıkıştırılabilirliğe sahiptir.

Dünyada ve ülkemizde çok sık kullanılan kimyasal zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

- Zemin enjeksiyonu
- Yüzeysel iyileştirme
- Derin karıştırma
- Jet enjeksiyonu
- Kireç kazıkları



Şekil 2.5: Zemin – çimento enjeksiyonu. (2017 Sabiha Gökçen havalimanı 2.pist inşaatı)



Şekil 2.6: Süper Jet Yöntemi Şeması. (Welsh ve Burke, 2000)

Jet grout ekipmanı ile zemin içerisine su-çimento karışımı verilmesiyle oluşturulan harç zemin karışımı ile zeminin özelliklerinin iyileşmesidir (Şekil 2.6). Bu yöntem ile zemin içerisinde kolonlar üretilmektedir. (Ataş ve Aral 2024)



Şekil 2.7: Derin zemin karıştırma (www.totemzemin.com)

Derin zemin karıştırma yöntemi zayıf zemin katmanlarına katkı maddeleri ekleyerek karadaki uygulamalarda 30 metre. Deniz uygulamalarında 70 metreye kadar yapılan yerinde zemin iyileştirme yöntemidir. (Erol 2016)

2.2.Kireç İle Zemin İyileştirilmesi

Kireç ile iyileştirme, çok eski uygarlıklarda başlayan günümüze kadar sıkça kullanılan bir yöntemdir. Antik Mezopotamya, Mısır, Yunan ve Roma'da yol iyileştirilmesi için zemin-kireç karışımı kullanılmıştır. Kireç iyileştirme yöntemi ilk defa Amerika'da 1904 uygulanarak denenmiştir. Bunun devamında 1924 yılı itibariyle sönmüş kireç, karayolu uygulamalarında iyileştirme malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sonraki yıllarda karayolu yapımının artmasıyla uygulamalarda kireç katkı malzemesinin kullanımı yaygınlaşmıştır. (Bell 1996).

Yapıyı taşıyan zeminin özellikleri yapının dayanımını etkileyerek uzun ömürlü olmasında belirleyicidir. Bina, yol vb. yapıların en temel unsuru olan taşıyıcı zeminlerin istenilen özelliklerde olmaması ciddi bir sorundur. Bu yöntem ile kireç zemin ile reaksiyona girerek kimyasal olarak iyileştirme sağlamaktadır. (Can 2017)

Kireç ile zemin iyileştirilmesi yöntemi ülkemizde son yıllarda kullanılmaya başlanılan kimyasal yöntemler içerisinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Özellikle ülkemizde örnekleri bahsedilen 2.2.5. bölümden de anlaşılacağı üzere karayollarında ve havaalanı sahalarında yüzeysel iyileştirme yapılarak uygulanabilmektedir.

2.2.1.Kireç türleri ve uygulanabilirliği

Killi zeminin kireç ile iyileştirilmesinde, kil parçacıkları topaklaştıkça, doğal plaka benzeri kil parçacıklarının iğne benzeri birbirine kenetlenen zemin tanelerine dönüşür. Bu sayede killi zeminin optimum su muhtevasında artış meydana gelmesi ile suya daha az duyarlı hale gelmektedir. Kireç ile iyileştirilme yöntemi, sönmemiş kireç (CaO) ya da sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ile sağlanabilirken, sönmemiş kireç kullanımı daha yaygındır. Bunun nedeni sönmemiş kirecin birim kütle başına daha yüksek serbest kireç içeriğine sahip olması ve kireç ağırlığının %32'si kadar su ile birleşerek sönmüş kirece dönüşürken mukavemet kazanımını ve su muhtevasını azaltarak yüksek ısı meydana getirmesidir (Rogers 1993).



Kireç stabilizasyonu uygulamalarının çoğunda kullanılan kireç miktarı, zemin kuru ağırlığının yaklaşık olarak %3'i ile %10'u arasında değişmektedir.

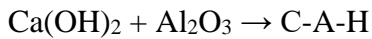
2.2.2.Kireç stabilizasyonunun kimyası

Killi zeminler karayolu yapımında birçok soruna neden olur ve tatmin edici bir performans için değiştirilmeleri veya stabilizasyon ile iyileştirilmeleri gerekir. Daha önce de belirtildiği gibi, kireç stabilizasyonu, killerin performansını artırmak için iyi bilinen bir teknik olup kilin kireçle karıştırılmasıyla çimentolu mineraller oluşur ve bu da mukavemet ve dayanıklılıkta bir iyileşmeye neden olur.

Killi bir zemine kireç katılarak oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda katyon değişimi, (topaklaşma) çökeltme-yığışma ve çimentolama oluşmaktadır. Bu reaksiyonlardan bazıları ilk saatlerde başlamaktadır. Uygun su muhtevası ve sıcaklığın sağlanması ile pozolonik reaksiyonların oluşumu yıllarca sürebilmektedir. Tek değerli katyonların killere birleşerek çift değerli kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirmesi katyon değişimi reaksiyonu sonucunda gerçekleşir. Bu oluşan reaksiyonlar ile zeminin yapısında belirgin bir değişim gerçekleşerek daha büyük tane içeren zemin elde edilir. (Broderick vd.1990)

Kirecin bir kısmı suda Ca^{2+} ve OH^- iyonlarına ayrılır. OH^- iyonu çözeltinin pH'ını artırır. Bu koşulda Ca^{2+} iyonları kil taneciklerini etrafında bağlayarak yüksek dayanımlı makro tanecikler meydana gelerek kil flokülasyon reaksiyonunu oluşturur.

Kirecin bir kısmı flokülasyon sağlamaktadır. Geri kalan kısmı kildeki silika ve Alümina ile reaksiyona girerek Portland çimentodakine benzer çimentoyu oluşturmaktadır.



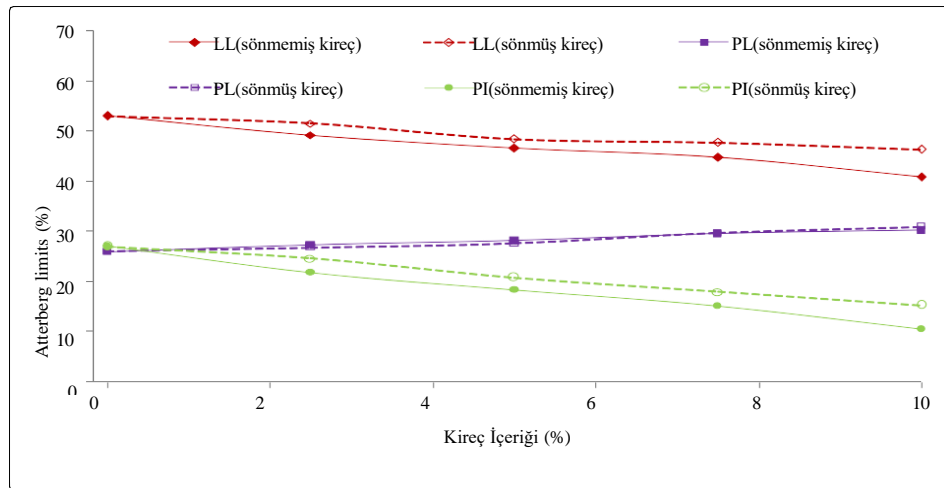
Kireç, kil minerallerindeki serbest SiO_2 ve Al_2O_3 ile reaksiyona girerek dayanım artıran kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum alüminat hidrat (CAH) oluşturur.

Bu koşullarda kil:

- Şişmez.
- Su ile temas ettiğinde kohezyonunu kaybetmez.
- Daha kolay sıkıştırılabilir.
- Mekanik performansı artar. (Atay 2022)

2.2.3.Kireç stabilizasyonunun geoteknik özelliklere etkisi

Kireç ile killi zeminlerin iyileştirilmesi, killi zeminin likit limitin azalmasına, plastik limitin artmasına dolayısıyla plastisitesinin azalmasına, ayrıca kireç ile kil mineralleri arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu meydana gelen bir çeşit çimentolama ile zeminin dayanımının artmasına neden olmaktadır. Zaman içerisinde kimyasal reaksiyonlar çevresel etkiler ile gelişme yaşandığından zemin dayanımı zaman ile artmaktadır.



Şekil 2.8: Kirece bağlı olarak Atterberg limitlerindeki değişim (Amadi ve Okeiyi 2017)

A. Amadi ve A. Okeiyi 2017 yılında yapmış olduğu çalışmalar kapsamında, artan kireç oranı ile zeminin plastisite azalmanın artmasına neden olmuştur. Benzer sonuçlar bu alanda yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. İyileştirme ile kireç tepkimeye girince ayrışan kalsiyum iyonlarının kil yapısı içinde veya üzerinde metal iyonlarıyla yer değiştirmesiyle oluşan katyon değişimi nedeniyle malzemenin işlenebilirliğinde ani bir değişiklik meydana gelebilir. Bu katyon değişimi, plastik limiti (PL) artırabilir ve dolayısıyla PI'yi azaltabilir. Kür süresi arttıkça, puzolanik reaksiyonlar etkisini zamanla artarak, plastisite daha fazla değişiklik meydana gelir ve böylece plastisite indeksi azalmaya devam eder. Plastisite de bu değişiklik, toprak-kireç karışımlarına daha ufalanabilir bir doku kazandırarak toprağı arazi ekipmanlarıyla hareket ettirmeye ve manipüle etmeye daha uygun hale getirir. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

Kireç ile iyileştirme killi zeminlerin yalnızca işlenebilirliğinin geliştirilmesi içinde tercih edilebilir. Killi zeminleri stabilize etmek için kirecin çimentodan daha etken bir katkı maddesi olduğu düşüncesi çoğu zaman doğru değildir. Çimento, PI değeri 20 ila 50 arasında olan killi zeminlerin stabilize edilmesinde kireç kadar iyi sonuç vermektedir. Kirecin çimentoyla birlikte kullanılması da oldukça yaygındır. (Şengül ve Vitoşoğlu 2023)

2.2.4.Kireç stabilizasyonunda serbest basınç deneyi ve kür süresinin etkisi

Kireç ile killi zeminin iyileştirilmesi kapsamında en çok kullanılan deneylerden birisi kohezyonlu zeminlerde yapılan tek eksenli serbest basınç deneyidir. Kireç ile killi zeminin etkileşimi, serbest basınç değerinin yükselttiği ve bu dayanımdaki yükselişin kür süresi ile arttığı yapılan çeşitli araştırmalar ile kanıtlanmıştır.

Kavak tarafından 1996 yılında yapılan araştırmalarda, saf bentonit ve kaolin killeri içeren numuneler ile yapılan çalışmalarda serbest basınç mukavemetleri incelenmiştir. Çalışma sonunda kil numunesinin serbest basınç mukavemetinin bentonit için 1 ayda 6 kat, kaolin için ise 12 kata varan dayanımda artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Dayanım artışı zeminin kür süresi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. (Kavak vd. 2009)

Kireç ile iyileştirme yapılan numunelerin serbest basınç deneyi esnasında, gevrek malzemelerde gözlemlenen kayma kırılması biçimi tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde bu kayma kırılmaları gözlemlenmiş dördüncü bölüm bulgular kısmında ele alınmıştır.

2.2.5. Kireç ile iyileştirme yönteminin arazide uygulanabilirliği

Kireç stabilizasyonu ülkemizde son yıllarda kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2004 yılında Kireç Sanayicileri Derneği ile yaptığı uygulamalı protokol ile yapılan iki ayrı deneme uygulaması sonuçlarının olumlu gelmesi ile “Karayolları Teknik Araştırma Dairesi” tarafından 2005 yılında Karayolları Teknik Şartnamesi 'ne kireç ile zemin stabilizasyonu eklenmiştir.

Karayolları Teknik Şartnamesinde “kireç ile stabilize edilecek zeminler, Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği (AASHTO) sınıflandırma sistemine göre A5, A6, A7, A-2-6, A-2-7 veya USCS sistemine göre CH, CL, MH, ML, GC, SC gruplarına giren Kireç stabilizasyonu için genellikle plastisite indisi değeri (PI) 10'dan büyük, kütlece en az %25'i ince daneli olan killi zeminler stabilizasyon-iyileştirme yapılması uygundur.” (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013)

Yapılan araştırmalar ile Türkiye de kireç ile zemin iyileştirme uygulama örneklerinden bazıları şunlardır:

- İstanbul Havalimanı Zemin Stabilizasyonu (2017)
- Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi 7 km zemin stabilizasyonu (2018 yılı)
- Yalova Organize Sanayi bölgesi zemin stabilizasyonu (2019 yılı)
- İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından 750.000 m3 kireç stabilizasyonu- yapım işi (2018 yılı)
- 1915 Çanakkale Köprüsü, Otoyol ve Bağlantıları Dahil Zemin Stabilizasyonu (2019 yılı)
- İstanbul İli Sazlıdere Barajı yakını yol zemin stabilizasyonu (2024-2025)



Şekil 2.9: Zemine kireç eklenmesi (İstanbul 2025)



Şekil 2.10: Zemin ile kirecin karıştırılması (İstanbul 2025)



Şekil 2.11: Keçi ayaklı silindir ile zemin sıkıştırılması (Tekirdağ B.B. 2018)



Şekil 2.12: Zemine arazöz ile su ilavesi (İstanbul 2025)

Kireç ile iyileştirme sonrasında üst tabaka imalatına başlanma işlemi 1 aydan fazla bekletilmemeli, eğer 1 ay sonrasında yapılması durumunda hava sıcaklığına bağlı olarak tabaka yüzeyinde kuruma gerçekleşeceğinden en az 3 gün yüzeyden ıslatma yapılması önerilir. Son ıslatma sonrasında silindir ile düzeltme yapılabilir bu durum sorumlu kontrol görevlisinin kararına bağlı olarak 7 güne kadar uygulanabilir. (Karayolları Genel Müdürlüğü 2013)



Şekil 2.13: Zeminin karıştırılması ve düzeltilmesi (İstanbul 2025)



Şekil 2.14: Zeminin titreşimli silindir ile düzeltilmesi (Tekirdağ B.B. 2018)



Şekil 2.15: Zemin iyileştirme sahası genel görünüm (İstanbul 2025)

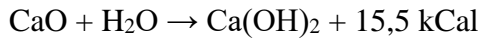
2.3. Su Muhtevasının Etkisi

Zemini oluşturan katmanların yüzeyinde ve danelerin arasında ki boşluklarda genellikle su mevcuttur. Su muhtevası oranı, zeminlerde geoteknik özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. Zeminlerin taşıma gücü kapasitesi, yük altında oturma miktarı, zeminin yapı olarak kullanıldığı (toprak barajlar vb.) veya inşaat malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda zemin-su etkisi çok önemlidir. Zemin davranışı üzerinde suyun etkisi çok önemlidir. (Özaydın 2011)

Killi zeminlerin kireç ile iyileştirilmesinde su muhtevası (nem oranı) çok kritik bir parametredir. Kireç stabilizasyonunun etkinliği; kimyasal reaksiyonların hızı, şişme–büzülme davranışı ve nihai dayanım üzerinde doğrudan etkili olur. Kireç ile zemin iyileştirme yöntemi, zeminin su muhtevasına bağlı olarak killi zemine sadece kireç ilavesi veya su ile karıştırılmış kireç bulamacının eklenmesi ile yapılabilir.

Kireç katkı maddesi ile yapılan uygulamalarda kullanılacak su tatlı ve temiz su olmalı içerisinde farklı bir madde bulundurmalı sülfat içeriği S03 <200 ppm olmalıdır. Bu şartların sağlanması uygulanabilirlik açısından önemli parametrelerdir.. (Kavak vd. 2008)

Kireç uygulamalarında, iyon değişimi, çimentolaşma ve karbonatlaşma reaksiyonların gerçekleşmesi için zeminde belirli miktarda su bulunmalıdır. Sönmemiş kireç kullanımında, kirecin ağırlığının %32 civarında su ile tepkimeye girerek su muhtevasında büyük düşüşe neden olabilmektedir. Kireç karışımından sonra zeminin optimum su içeriği değişir (genelde artar).



Eğer su optimum civarında ise zemin:

- Daha iyi sıkışır,
- Daha homojen karışır,
- Puzolanik reaksiyonlar en verimli şekilde çalışır. Bu durumda dayanım ve rijitlik en yüksek seviyeye ulaşır.

Su muhtevası optimumdan fazla olduğunda:

- Zemin çamurlaşır → iyi sıkışmaz.
- Kireç etkili şekilde dağılmaz → heterojen yapı oluşur.
- Puzolanik reaksiyonlar su fazlalığı nedeniyle gecikir.
- Kısa vadede CBR, kohezyon ve serbest basınç dayanımı düşer.
- Kireç eklese bile şişme potansiyeli ilk aşamada tam olarak kontrol altına alınamayabilir.

Aşırı su, stabilizasyon öncesi ön kurutma veya daha fazla kireç gerektirebilir. Kireç çeşidinde değişikliğe gidilebilir, sönmemiş kireç kullanılabilir.

2.4. Kireç Stabilizasyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Bozkurt (2020) “*Arazide Yüksek Su Muhtevası İçeren Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu*” adlı çalışmada, Yalova bölgesinden temin edilen kil numunelere farklı oranlarda sönmüş kireç ve sönmemiş kireç ekleyerek numunelerin serbest basınç deney sonuçlarına bakılmıştır. Kil numunesinin indeks özelliklerine bakılarak CH zemin sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Daha sonra kireçsiz ve farklı oranlarındaki kireç katkılı killerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri bulunmuştur. Çalışma kapsamında kireçsiz ve kireç katkılı numuneler üzerinde farklı kür süreli serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca serbest basınç deneyi sonucunda ortaya çıkan mukavemet değerleri yaş CBR deneyi ve arazide yapılan plaka yükleme deneyleriyle desteklenmiştir. Kil numunesine kireç eklenmesi ile serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olmuştur. Bu sonuçlardan kirecin zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini değerlendirilmiştir.

Geçkil (2019), yaptığı çalışmada kil bir zemine kireç katkısının dayanıma etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın kapsamında kireç katkı maddesi, kil numunesinin içerisine ağırlıkça farklı yüzdelerde eklenmiştir. Elde edilen kireç katkılı numuneler, kil içine kilin ağırlığının farklı oranlarda eklenmesi ile elde edilmiştir. Numunelerin indeks özelliklerini belirlemek için kıvam limit deneyleri, daha sonra kür süresine bağlı olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kompaksiyon ve CBR deneyleri de yapılmıştır. Deney sonuçlarında kireç artması ile plastisite indisinde azalma, su muhtevasında artış gözlemlenmiştir. Serbest basınç deneyleri yapılan 7 ve 28 günlük numuneler içerisinde %5 kireç oranlı numunede en yüksek serbest basınç dayanım değeri elde edilmiştir. %5 kireç katkılı numunede CBR değerleri katkısız tabii kil zemine göre artış olduğu tespit edilmiştir.

Amadi ve Okey (2017) çalışmalarında Tropikal ve subtropikal bölgelerde önemli bir toprak grubu olan yerel olarak bulunan lateritik toprağa ayrı ayrı uygulandığında farklı yüzdelerdeki sönmüş ve sönmemiş kirecin stabilizasyon etkinliğini değerlendirmek ve karşılaştırmak için bir laboratuvar çalışması yürütülmüştür. Performans değerlendirme deneyleri şunları içermektedir: Atterberg limitleri, sıkıştırma, serbest basınç testleri, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), CBR cihazı kullanılarak şişme potansiyeli ve hidrolik iletkenlik. Serbest basınç dayanımı (UCS), CBR, şişme potansiyeli ve hidrolik iletkenlik testleri için kullanılan toprak karışımları, İngiliz standart hafif sıkıştırma kuvveti kullanılarak optimum nem içeriğinde sıkıştırılmış ve 28 gün boyunca kürlenmiştir. Sönmemiş kirecin zeminin daha düşük plastisiteye sahip olmasına neden olduğu, sönmüş kirecin ise daha yüksek kuru birim ağırlık sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, özellikle daha yüksek dozajlarda (%7,5 ve %10) toprak numunesi sönmüş kireç ile işlendiğinde daha yüksek UCS değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, sönmüş kireç numunesinin CBR değerleri, kireçle stabilize edilmiş toprağın üstün yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Son olarak, sönmemiş kireç katkılı numuneler sönmüş kireç katkılı biraz daha düşük şişme değerlerine ulaşırken, iki tür kireç katkılı numunelerin hidrolik iletkenlik değerlerinde gözle görülür bir fark gözlenmemiştir. Yukarıdaki sonuçlardan, sönmemiş kirecin biraz daha üstün mühendislik özellikleri sergilediği ve bu nedenle toprak için daha etkili bir stabilizasyon alternatifi oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Can (2017) “Sülfat içeriği ve sıkıştırma su muhtevasının killi zeminlerin kireç stabilizasyonuna etkisi” isimli yüksek lisans çalışmasında, killi zeminlerin sülfat içermesi ile karşılaşılan sorunlar üzerine çalışma yapılmıştır. Katkı maddesi ile iyileştirme yapılmadan zeminde sülfat içeriği tespiti çok önemlidir. Çalışma kapsamında, İstanbul Üçüncü Havalimanına yakın bölgeden temin edilen kile kireç katkısı ile stabilizasyon ve sülfat içerik durumu incelenmiştir. Yapılan deney sonuçları ile numunelerin geoteknik özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan şişme deneyleri ile numunelerin dayanımının düştüğü numunelerin kür süresine bağlı olarak kırılma meydana geldiği saptanmıştır. Sülfatlı ve sülfatsız numunelerin sonuçları incelendiğinde sülfatsız numunelerin belirgin bir farkla dayanımının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. .

Şengül (2010) tarafından yapılan çalışma ile yüksek su içeriğine sahip killi yol taban zeminlerinin kireç katkısı ile iyileştirilmesi ve hücresel dolgu teknikleriyle iyileştirilmesi yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada, su muhtevası artırılarak yüksek su muhtevalı killi zemine farklı oranlarda kireç karıştırılarak CBR deneyleri yapılmıştır. Kireç katkısı veya hücresel dolgu güçlendirme yöntemlerinin tek başlarına oturmaları ve düşey gerilmeleri belirgin bir şekilde azaltmadığı, dayanımı istenilen seviyede artırmadığı tespit edilmiştir. Yüksek su muhtevalı zeminlerde bu yöntemlerin tek başına yeterli olmayacağı değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

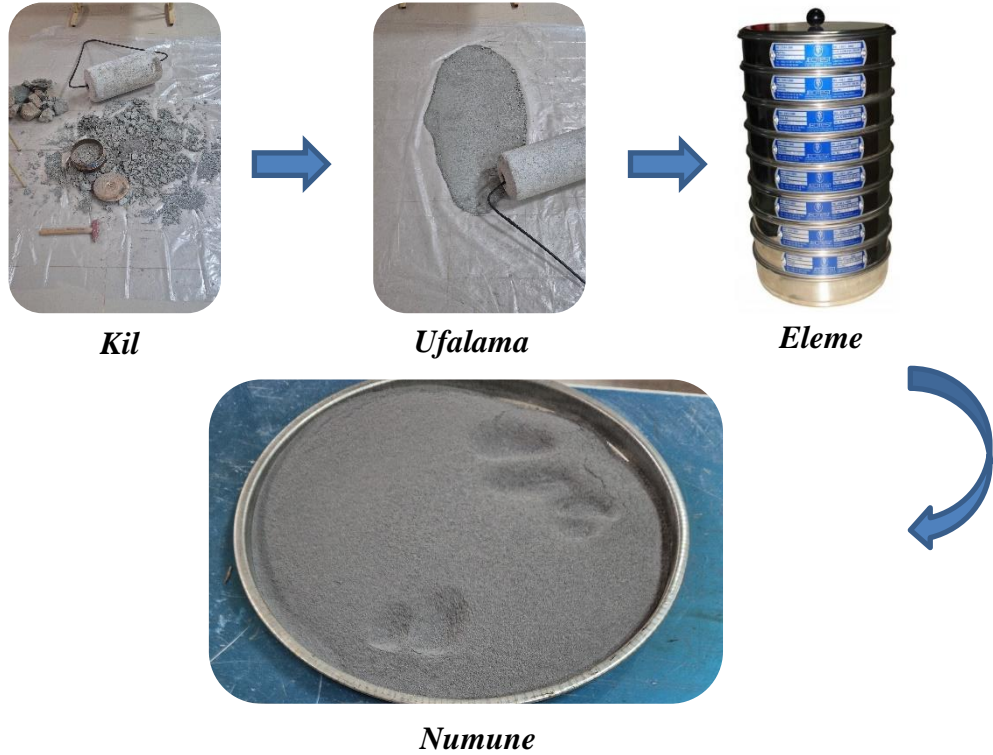
Bu bölüm içerisinde yapılan deneylerde kullanılan malzemeler, deneysel program, numune hazırlama aşamaları ve deneyler başlığında yapılan deneyler ayrıntılı bir biçimde ele alınmıştır.

3.1. Malzeme

Malzeme ana başlığı altında, deneylerde kullanılacak olan kil numunesinin ve en önemli katkı maddesi olan kirecin temin edilmesi ve özellikleri hakkında ayrıntılar incelenmiştir.

3.1.1. Zemin

Tez çalışması kapsamında numuneler için gerekli killi zemin Erzincan ili bölgesinden temin edilmiştir. Deneyler Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Temin edilen killi zemin, numuneler de kullanmak üzere loğ taşı diye tabir edilen alet yardımı ile ufalanmıştır. İşlem %100'ü 40 No'lu elekten geçecek şekilde ufalama yapılmıştır. Yapılan kıvam limitleri ve serbest basınç deneylerin de %100'ü 40 No'lu elekten geçen zemin kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Kil numunesi ufalama işlemi

Zemine elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılarak zeminin indeks özellikleri belirlenmiştir. Değerler Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Kil numunesinin özellikleri

Likit Limit (%)	21
Plastik Limit (%)	14
Plastisite İndisi	7
4 numaralı elekten geçen yüzde (4,75 mm)	88
200 numaralı elekten geçen yüzde (0,075mm)	54
Zemin Sınıfı (USCS)	CL
Renk	Koyu Antrasit

3.1.2.Kireç

Tez çalışmamızda killi zemine katkı ana etken maddesi olan sönmüş kireç $\text{Ca}(\text{OH})_2$, piyasada bulunan, Tekkim Kimya Sanayi firmasına ait hazır sönmüş kireç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ temin edilerek kullanılmıştır. Temin edilen numune, zemin sınıfı bakımından KGM’nin Kireç Şartnamesi (2023)’ne uygundur. Sönmüş kireç torba halinde satın alınmıştır. Kullanılan kireç Tablo3.2’de bulunan kimyasal değerleri sağlamaktadır.

Saha uygulamalarında öncelikle sönmemiş kireç uygulaması daha yaygındır ancak kil iyileştirmesinde laboratuvarında sönmüş kireç (Kalsiyum hidroksit) tercih edilir; çünkü sönmemiş kireç (Kalsiyum oksit) suyla temas ettiğinde çok hızlı ve şiddetli bir reaksiyon verir. Laboratuvarında amaç kontrollü ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için sönmüş kireç kullanılmaktadır.

Tablo 3.2: Kirecin kimyasal özellikleri

Spesifikasyon	Yaklaşık Değerler
Safiyet Ca (OH) ₂	>=87.0 %
Magnezyum oksit (MgO)	<=1.0 %
Asitte çözünmeyen	<=1.0 %
Kızdırma kalıntısı	<=3.0 %
Partikül boyutu (<90 µm)	>=90.0 %

3.2 Deneysel Program

Doğadan elde edilen tabii zemin numunesine elek analizi deneyi ile tane dağılımı elde edilmiştir. Ardından kıvam limit deneyleri yapılarak zeminin özellikleri belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında killi zeminin farklı su muhtevalarında kireç ile iyileştirilmesini analiz etmek için 101 numune tabloda belirtilen farklı su muhtevaları ve farklı kireç oranlarında hazırlanıp desikatörde muhafaza edilerek 7, 28 ve 91 günlük serbest basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Numunelerin hazırlanma aşamasında ve deney sonrasında su muhtevaları ve ağırlıkları elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır.

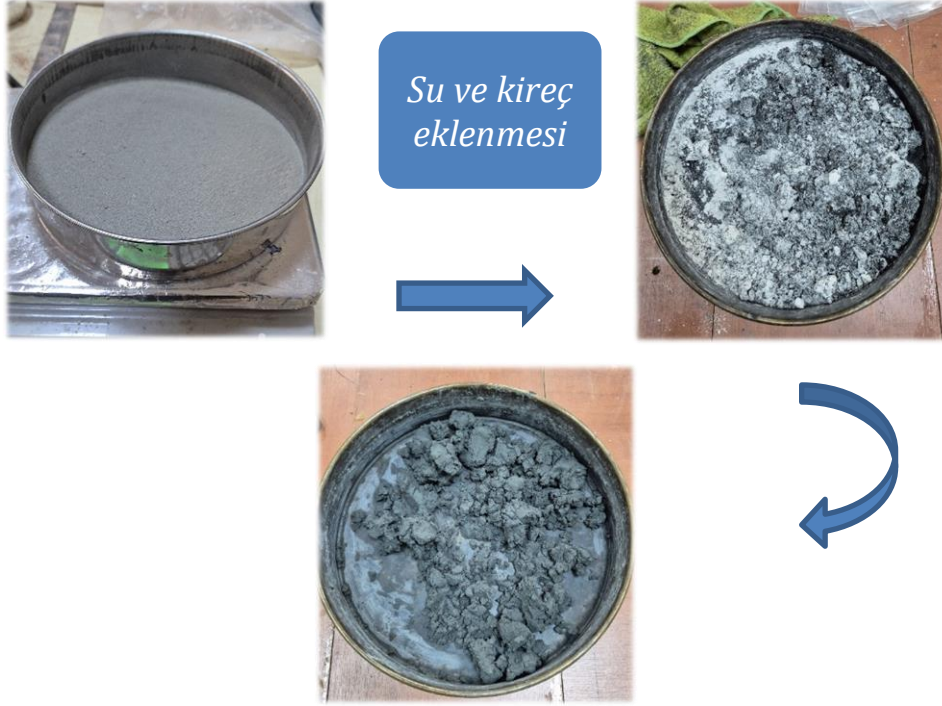
Tablo 3.3: Su muhtevası ve kireç oranları

Numune	Su Muhtevası (%)	Kireç Oranı (%)	Numune	Su Muhtevası (%)	Kireç Oranı (%)
CL-1-12-0	12	0	CL-1-14-0	14	0
CL-1-12-2	12	2	CL-1-14-2	14	2
CL-1-12-4	12	4	CL-1-14-4	14	4
CL-1-12-6	12	6	CL-1-14-6	14	6
CL-1-12-8	12	8	CL-1-14-8	14	8
CL-1-12-10	12	10	CL-1-14-10	14	10
CL-1-16-0	16	0	CL-1-18-0	18	0
CL-1-16-2	16	2	CL-1-18-3	18	3
CL-1-16-4	16	4	CL-1-18-6	18	6
CL-1-16-6	16	6	CL-1-18-9	18	9
CL-1-16-8	16	8	CL-1-18-12	18	12
CL-1-16-10	16	10	CL-1-18-15	18	15
CL-1-21-4	21	4	CL-1-24-5	24	5
CL-1-21-8	21	8	CL-1-24-10	24	10
CL-1-21-12	21	12	CL-1-24-15	24	15
CL-1-21-16	21	16	CL-1-24-20	24	20
CL-1-21-20	21	20	CL-1-24-25	24	25

3.3 Numune Hazırlanması

Laboratuvara getirilen zemin, öğütme işlemi yapılarak elek analizi ile tamamı 40 No'lu elekten geçen malzeme elde edilmiştir. Öğütme işlemi loğ taşı ile yapılmış olup, %100 kısmı 40 No'lu elekten geçene kadar devam etmiştir. 100 numune hazırlanması için gerekli olan 33 kg numune öğütme işleminden geçirilerek tamamı 40 No'lu elekten elenmiştir. Katkı maddesi olarak özellikleri yukarıda belirtilen kireç piyasadan temin edilmiştir. Tüm deneylerde musluk suyu kullanılmıştır. Kuru kil numunesine doğal kurutma yapılmıştır. Deney öncesi su muhtevası kontrolü yapılmış olup numunenin hazırlanan su muhtevası oranlarını etkilemediği gözlemlenmiştir.

Serbest basınç deneyi numunesi olan silindirik zemin örneği (D=38 mm, H=76mm) hazırlanırken homojen olabilmesi deney için çok önemlidir. Bu neden ile tüm deneylerde aynı metot uygulanmıştır. Çizelge 3.2 belirtilen zeminin kuru ağırlığının %12, %14, %16, %18, %21, %24 oranlarında su eklenerek topaklanma olmayacak şekilde karıştırılarak öncelikle 1 saat süre ile üzeri nemli bir bezle kapatılarak bekletilmiş ve suyun kil içerisinde dağılması için 1 saatlik numune dinlenme süresi sağlanmıştır.



Şekil 3.3: Kil numunesine su ve kireç eklenmesi

6 farklı su muhtevasında hazırlanan numunelere, zeminin kuru ağırlığınca tabloda belirtilen oranlarca kireç eklenmiş olup homojen olarak dağılması için topaklanmaya kalmayana kadar 15 dakika el ile yoğurma işlemi yapılmıştır. Kireçli zemin numunesi 1 saat dinlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.4: Numune hazırlama aşamaları

Hazırlanan kireçli zemin numunesi her bir silindirik numune için 3 adet yaklaşık olarak 65 gram kaplara konularak silindirik zemin numunesi hazırlama için silindirik boruya 3 katman halinde konularak ve her bir katmanın demir boruyla sıkıştırılması ile hazırlanmıştır. (Şekil 3.4.)



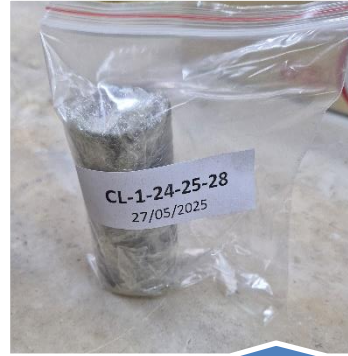
Numunenin çıkarılması



Numune Tartım ve ölçülmesi



Numunenin streçleme



kilitli poşete koyma ve etiketleme

Şekil 3.5: Numunenin çıkarılması, tartılması ve paketlenmesi

Silindirik boru içerisinde bulunan numune kalıp yardımı ile dikkatlice çıkartılarak ağırlıkları tartılmıştır. (Şekil3.5) Numunelerin kalıptan kolay ve deformasyona uğramadan çıkarılabilmesi için her numune hazırlanması akabinde temizleme ve yağlama işlemi yapılmıştır. Bu aşamada numunenin parçalanmadan çıkarılmasına önem gösterilmiş olup çalışmanın akıbeti için kırılan numune olması durumunda tekrardan hazırlanmıştır.

Çıkarılan numune su muhtevasında azalma olmaması için streç ile sarılmış ve kilitli poşetlere konularak üzerlerine hazırlanma tarihi, su muhtevasını, kireç oranını ve kaç günlük serbest basınç deneyi yapılacağını belirten etiket yapıştırılarak desikatörlere yerleştirilmiştir. (Şekil3.4) Toplam 101 numune hazırlanırken deney öncesi su muhtevaları alınmıştır.



Şekil 3.6: Desikatörde numune muhafazası

Hazırlanan numuneler desikatörde muhafaza edilmiş olup deney günü ağırlıkları tartılarak 7, 28 ve 91 günlük serbest basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi yapılan tüm numunelerin de deney sonu su muhtevaları alınarak deney öncesi ve deney sonrası su muhtevaları elde edilmiştir.

3.4 Deneyler

Bu başlık altında elek analizi, kıvam limit deneyleri ve serbest basınç deneyleri incelenmiştir.

3.4.1 Elek analizi

Islak elek analizi (yıkamalı analiz) deneyi

Zemin numunesinin içerisinde bulunan 74 mikron (0.074 mm veya 200 No'lu elek)'dan küçük kil oranını belirlemek için, ufalama işleminden sonra bir miktar zemin numunesi alınır, 24 saat etüvde bekletildikten sonra tartılarak 200 No'lu elek üzerine konularak su altında yıkanır. Yıkamaya bulanıklık sona erinceye kadar devam edilir. 200 No'lu elek üzerinde kalan malzeme etüvde kurutulur tartılır.



Numune etüv sonrası tartılır



Yıkama işlemi yapılır



200 nolu elek üzerinde kalan numune etüv sonrası tartılır

Şekil 3.7: Islak elek analizi

200 No'lu elek üzerinde 404,5 gram numuneye yıkama işlemi yapılmış, 200 No'lu elek üzerinde kalan kısım 24 saat etüvde bekletildikten sonra tartıldığında 187,8 gram olarak ölçülmüştür. $187,8/404,5 = \%46,42$ oranında numunenin **75** μm üzerinde boyuta sahip olduğu tespit edilmiş, numunenin $\%53,58$ kısmı 200 No'lu elekten geçtiği anlaşılmış olup, zemine yapılan kıvam limit deneyleri ile Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine (ASTM D2487) göre Zeminin CL-Düşük Plastisiteli İnorganik kil olduğu sonucuna varılmıştır.

3.4.2 Kıvam limit deneyi

Likit limit deneyi



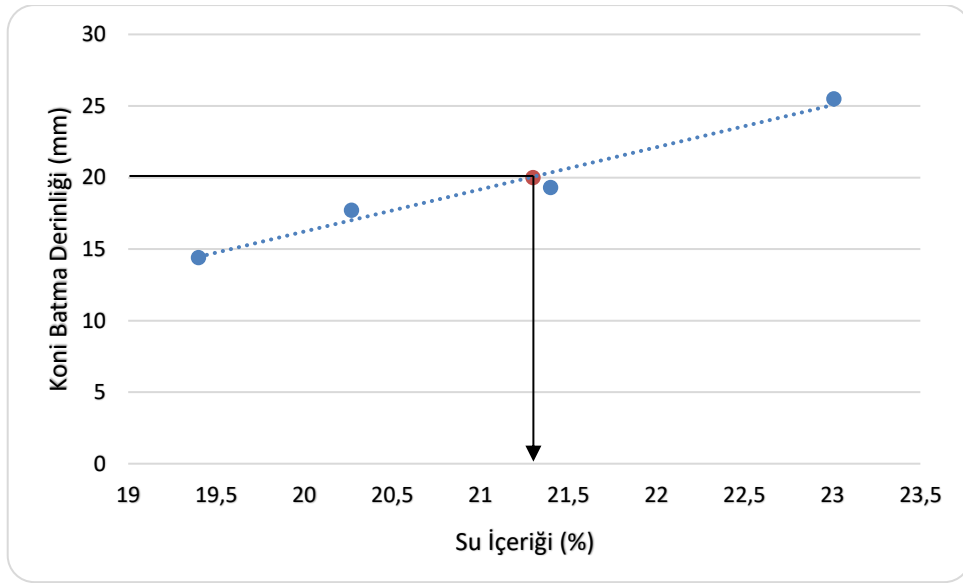
Şekil 3.8: Koni batma deney aleti

Zeminin indeks özelliklerini belirlemek için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit belirleme yöntemlerinden koni batma deneyi yapılmıştır. Koni batma likit limit deneyi, standart ölçülere sahip metalik bir koninin kendi ağırlığı altında 5 saniye sürede zemin örneğinin içine batmasından hareketle likit limitin belirlenmesi esasına dayanır. Bu deneyde 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su içeriği zeminin likit limit değeri olarak alınır. (Orhan vd. 2018).

Tabi kil zemine kıvam limit deneyi yapılmıştır. 40 No'lu elekten geçen zemin etüve koyulmuş, etüv sonrasında likit limitini belirlemek için koni batma deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda likit limit, 20mm'lik penetrasyona karşılık gelen su içeriği olup, 21 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.4: Likit limit koni batma deney sonuçları

LİKİT LİMİT	1.Test	2.Test	4.Test	4.Test
Kap Numarası	G	K	H	F
Yaş Ağırlık + Kap Ağırlığı	59,86	77,96	65,02	92,74
Kuru Ağırlık + Kap Ağırlığı	54,61	69,45	58,74	80,64
Kap Ağırlığı (Dara)	27,56	27,51	28,35	28,07
Penetrasyon d (mm)	14,4	17,71	19,3	25,5
W (%)	19,4	20,27	21,4	23,01



Plastik limit deneyi

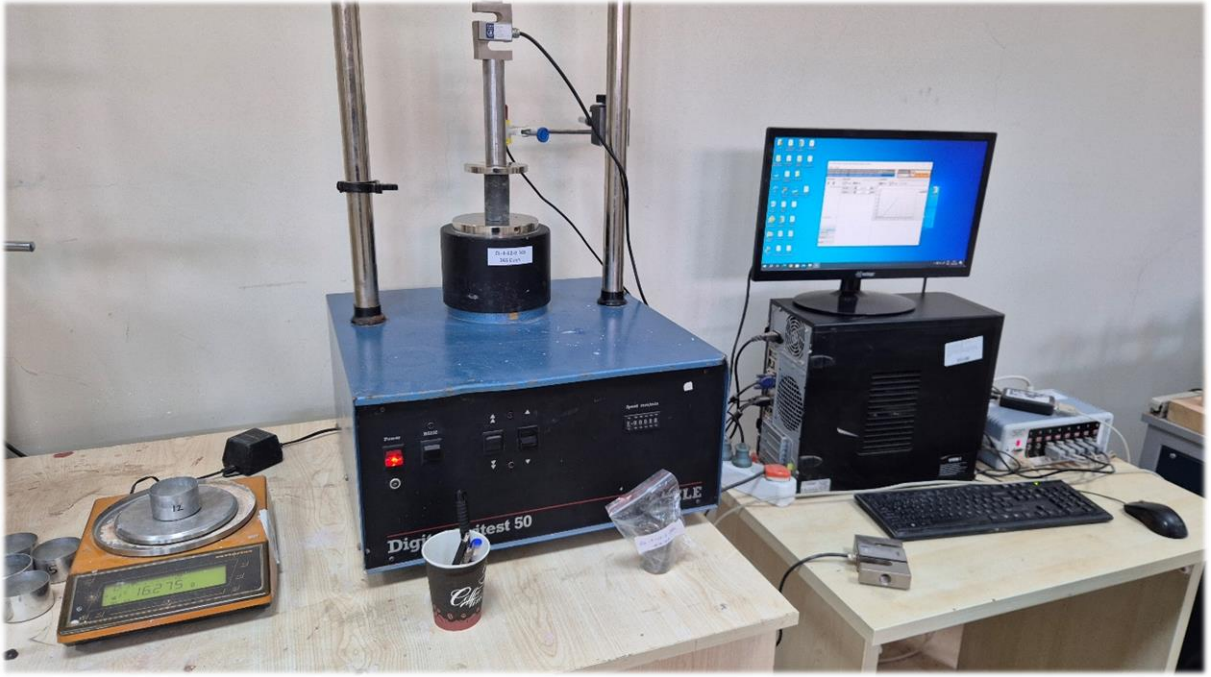
Plastik limit deneyi, zeminin plastik kıvamda olduğu durumdaki en düşük su içeriğini belirlemek için yapılır. Cam veya plastikten yapılmış düz bir yüzey üzerine el ayasıyla veya parmaklarla muntazam bir şekilde yuvarlanan zemin örneği, 3 mm çapında ve yaklaşık 10 mm uzunluğundaki bir silindir şeklini kazandığında, su içeriğinden dolayı kırılıp çatlama meydana geldiği andaki su içeriği, zeminin plastik limiti olarak değerlendirilir. (Orhan vd. 2018). Yapılan deney sonucunda 13,7 olarak bulunmuş olup, zeminin plastisite indisi 7,3 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere göre $LL=21$ VE $PI=7$ olan zemin USCS'ye göre ince taneli zeminleri sınıflandırmada kullanılan plastisite kartından kontrol edildiğinde CL olarak sınıflandırılır.

Tablo 3.5: Plastik limit deney sonuçları

PLASTİK LİMİT	1.Test	2.Test
Kap Numarası	33	38
Yaş Ağırlık + Kap Ağırlığı	23,81	21,42
Kuru Ağırlık + Kap Ağırlığı	21,71	19,68
Kap Ağırlığı (Dara)	6,54	6,86
W (%)	13,84	13,57
Ortalama Plastik Limit	14	

3.4.3 Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır. Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısılması (eksenel şekil değiştirmesi) ölçülmekte ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değer) zeminin serbest basınç mukavemet değerini vermektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için boy uzunluğu/çap oranının $h/d \geq 2$ olarak seçilmesi uygun olmaktadır.



Şekil 3.9: Serbest basınç deney aleti

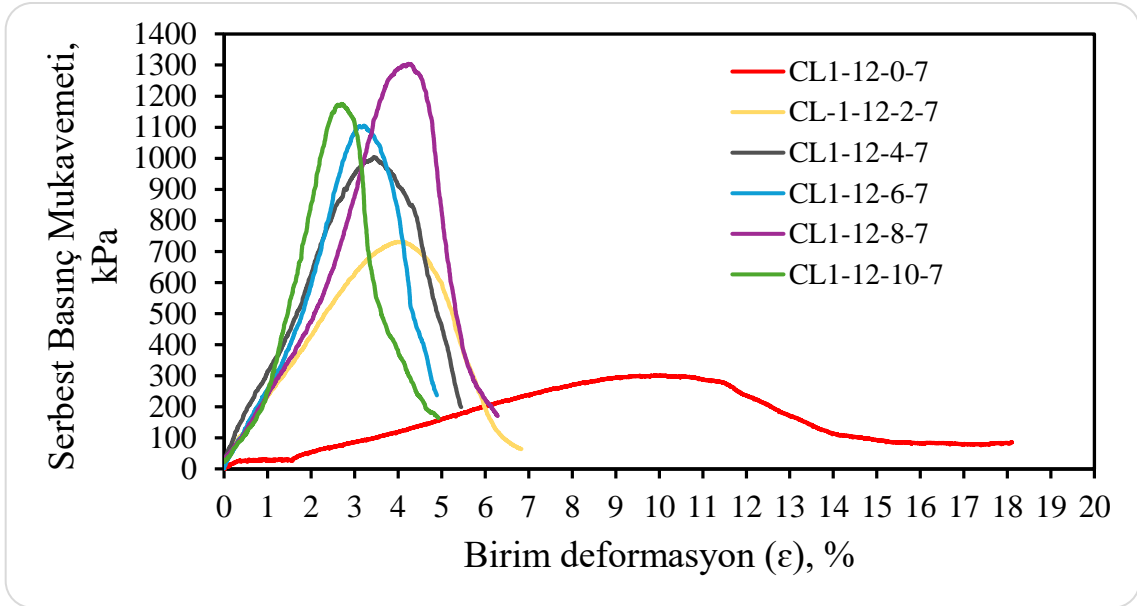
Öğütülen ve 40 No'lu elekten geçen zemine tabloda belirtilen su muhtevaları ve kireç oranları eklenerek silindirik $D=38\text{mm}$ $H=76\text{mm}$ olan 101 numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler desikatörde bekletilmiş olup 7, 28 ve 91 günlük serbest basınç deneyi yapılarak elektronik olarak uygulanan yük ve deformasyon değerleri elde edilerek mukavemet değerleri, deformasyon miktarları, aksenal gerilme – birim deformasyon ilişkisi bulunmuştur.

Deneyler ASTM D2166 standardına göre, deney hızı (yükleme hızı) 1,00 olarak serbest basınç deneyi yapılmıştır.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI

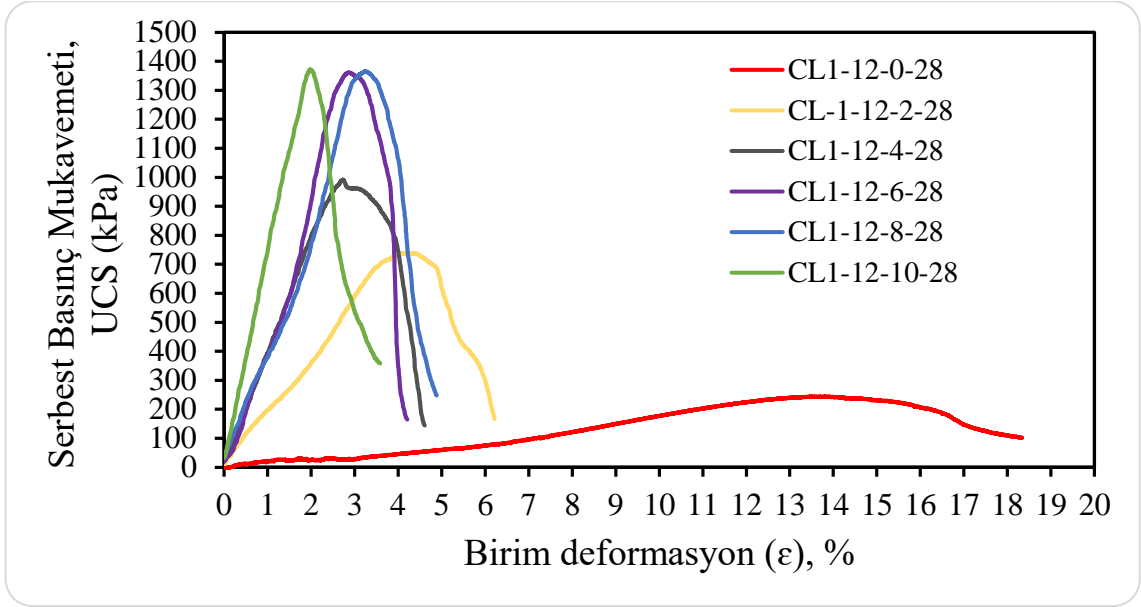
4.1. w= %12 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

%12 su muhtevasına sahip numuneler kireçsiz, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında sönmüş kireç eklenerek hazırlanmış, 7, 28 ve 91 günlük serbest basınç deneyi yapılmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir. Grafikler genel olarak incelendiğinde kireçsiz eğrinin daha yatık olduğu, kireç oranı artması ile gerilme-şekil değiştirme eğrisinin sola doğru yükseldiği, birim deformasyonun azaldığı, dayanımın kireç oranı ile arttığı gözlemlenmiştir. %12 su muhtevası için ideal kireç oranının %6 olduğu tarafımızca değerlendirilmiştir.



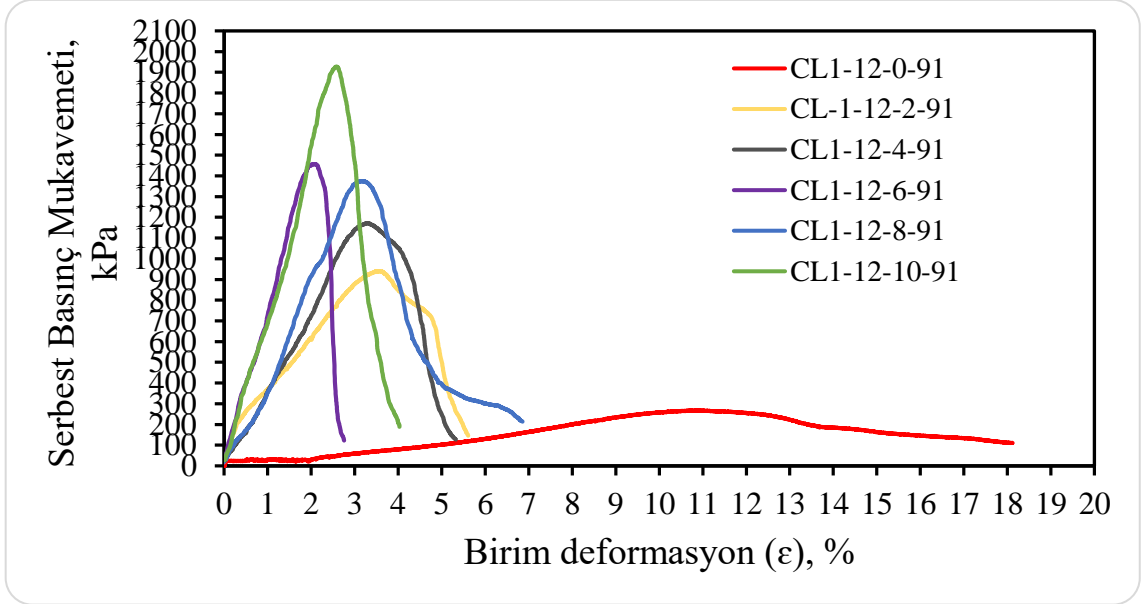
Şekil 4.1: w=%12 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

W=%12 olan numuneye kireç eklenmeden ve kuru kil miktarının %2, %4, %6 %8 ve %10 oranlarında kireç eklenerek 7 günlük serbest basınç deneyi yapılmış olup gerilme – birim şekil değiştirme grafiği şekil 4.1 de gösterilmiştir. Kireç eklenmeden yapılan deneyde 7 günlük dayanım 301 kPa iken %2 kireç oranında 731 kPa, %4 kireçli numunede 1003 kPa, %6 kireçli numunede 1104 kPa, %8 kireçli numunede 1304 kPa ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1174 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



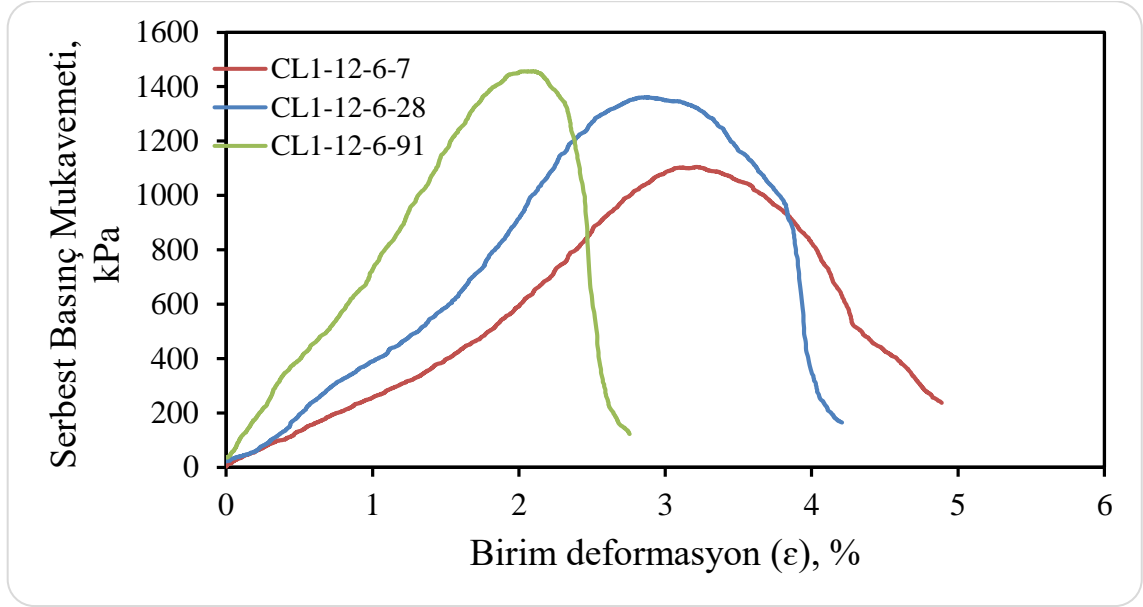
Şekil 4.2: w=%12 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

w=%12 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç deneyi grafiği şekil 4.2 de gösterilmiştir. Kireçsiz numune 28 günlük dayanım 243 kPa iken %2 kireçli numunede 738 kPa, %4 kireçli numunede 991 kPa, %6 kireçli numunede 1361 kPa, %8 kireçli numunede 1365 kPa ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1371 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



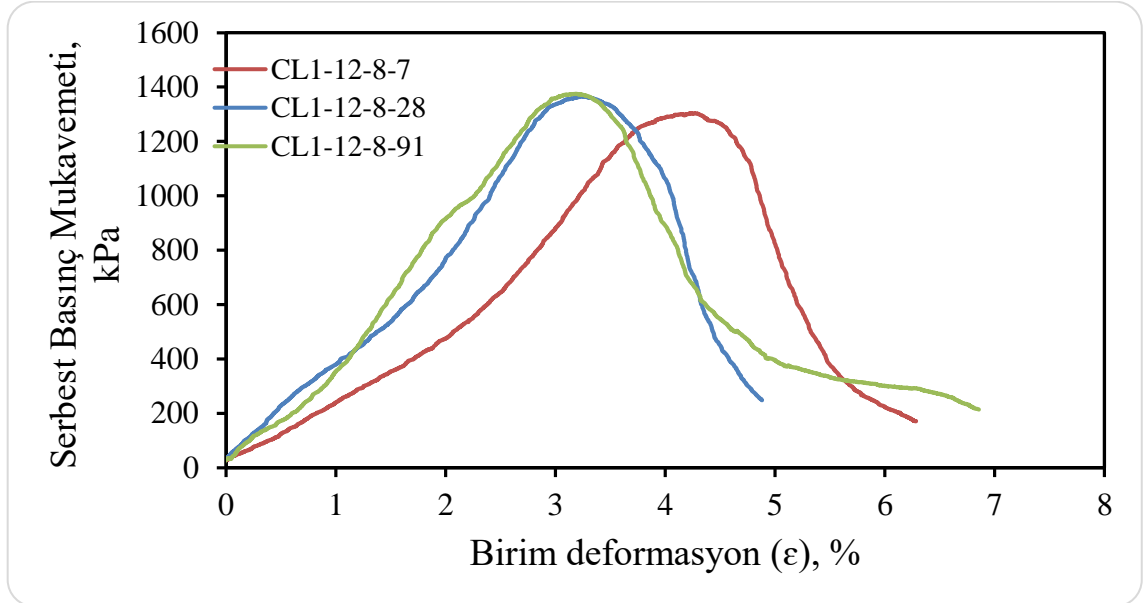
Şekil 4.3: w=%12 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

w=%12 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç deneyi grafiği şekil 4.3 de gösterilmiştir. Kireçsiz numune 91 günlük dayanım 267 kPa iken %2 kireçli numunede 940 kPa, %4 kireçli numunede 1171 kPa, %6 kireçli numunede 1456 kPa, %8 kireçli numunede 1375 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1927 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



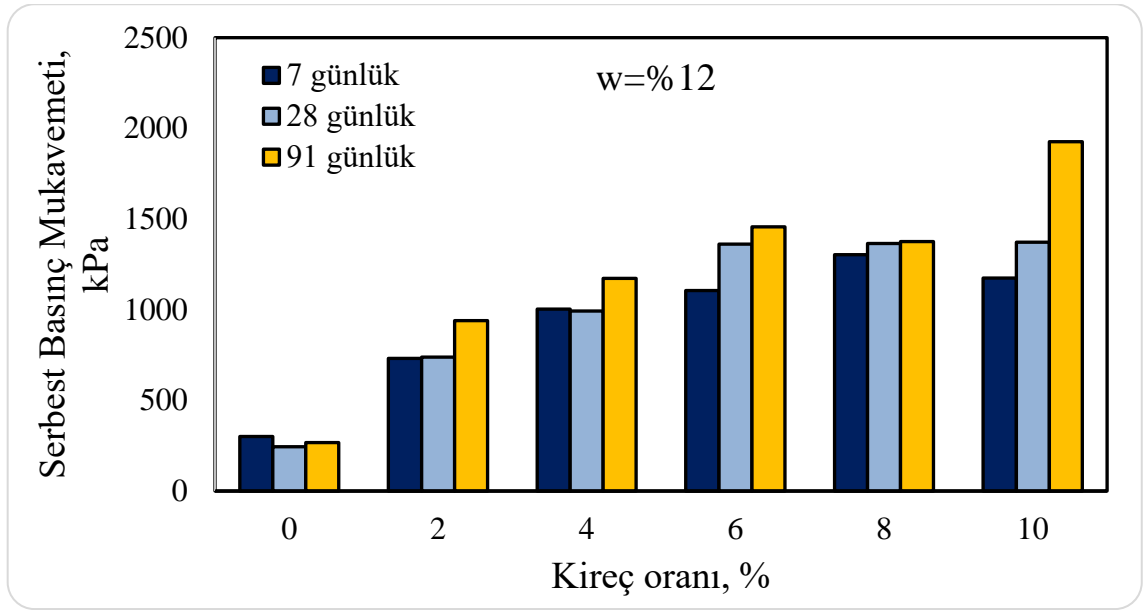
Şekil 4.4: %12 su muhtevalı %6 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%6 sönmüş kireç ve %12 su muhtevası ile hazırlanan tabi numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 1104 kPa, 28 günlük 1361 kPa ve 91 günlük 1456 kPa görülmüştür. Kür süresi ile dayanımın arttığı şekil 4.4 grafikten anlaşılmıştır.



Şekil 4.5: %12 su muhtevalı %8 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%8 sönmüş kireç ve %12 su muhtevası ile hazırlanan tabi numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 1304 kPa, 28 günlük 1365 kPa ve 91 günlük 1375 kPa görülmüştür. 28 ve 91 günlük dayanımın değişmediği gözlemlenmiştir.



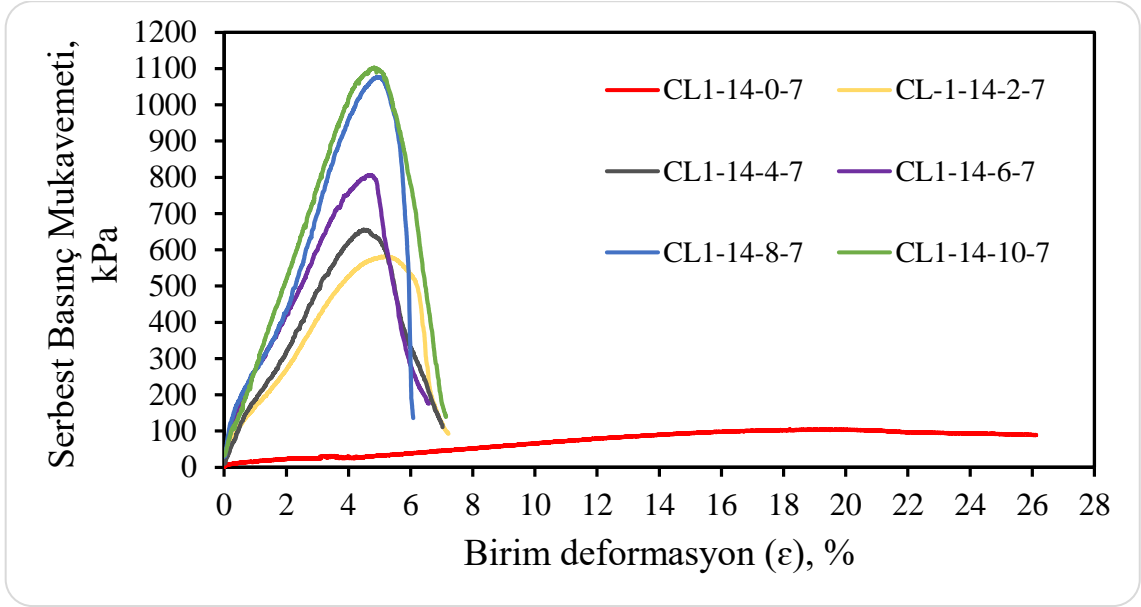
Şekil 4.6: %12 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

w= %12 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.6. gösterilmiş olup kireç oranının artması ile dayanımın arttığı %6 kireç oranından sonra artışın olmadığı fazla kirecin tepkimeye girmediği w=%12 için ideal kireç oranının %6 olduğu değerlendirilmiştir.

4.2. w= %14 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

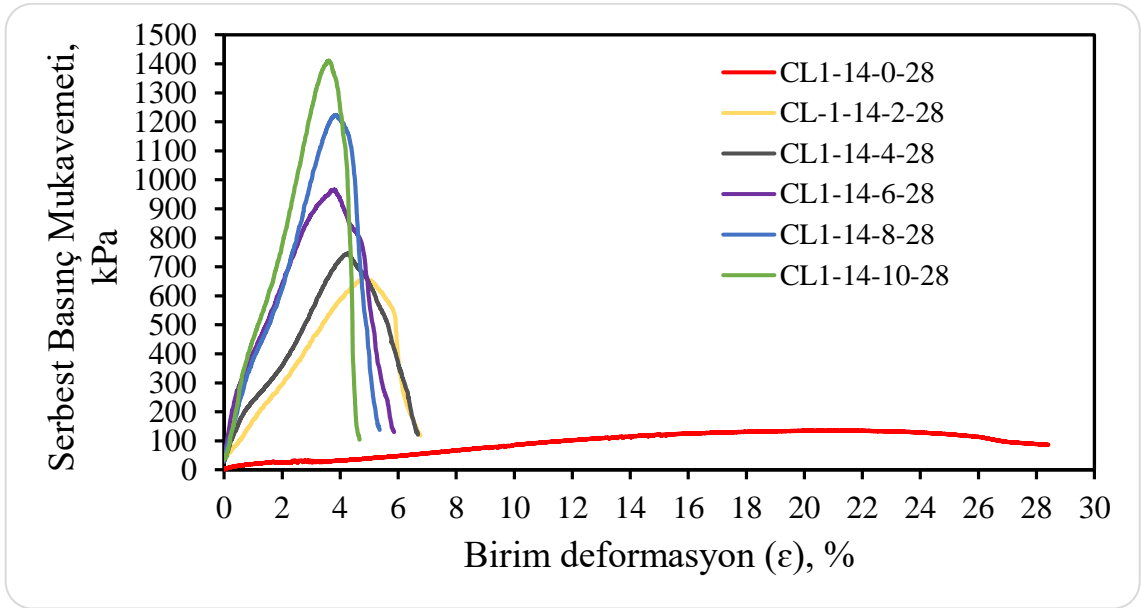
%14 su muhtevalarına sahip numuneler kireçsiz, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında sönmüş kireç eklenerek hazırlanmış olup her bir kireç oranı için 7, 28 ve 91 günlük toplamda %14 su muhtevalarına sahip 18 numune hazırlanmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir.

Aşağıdaki grafikler değerlendirildiğinde kür süresi ile mukavemetin arttığı ve birim deformasyonun azaldığı gözlemlenmiştir. Kireç oranına bağlı olarak dayanımda artış olduğu gözlemlenmiştir.



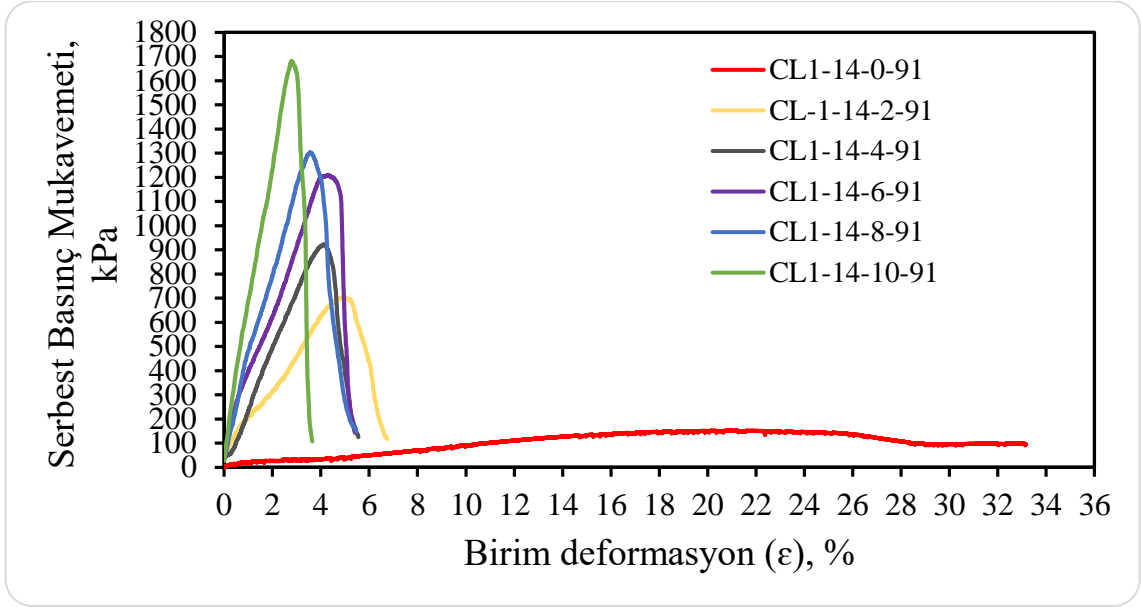
Şekil 4.7: w=%14 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

w=%14 olan numunelerin 7 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.7 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 104 kPa iken %2 kireçli numunede 582 kPa, %4 kireçli numunede 655 kPa, %6 kireçli numunede 805 kPa, %8 kireçli numunede 1076 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1102 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



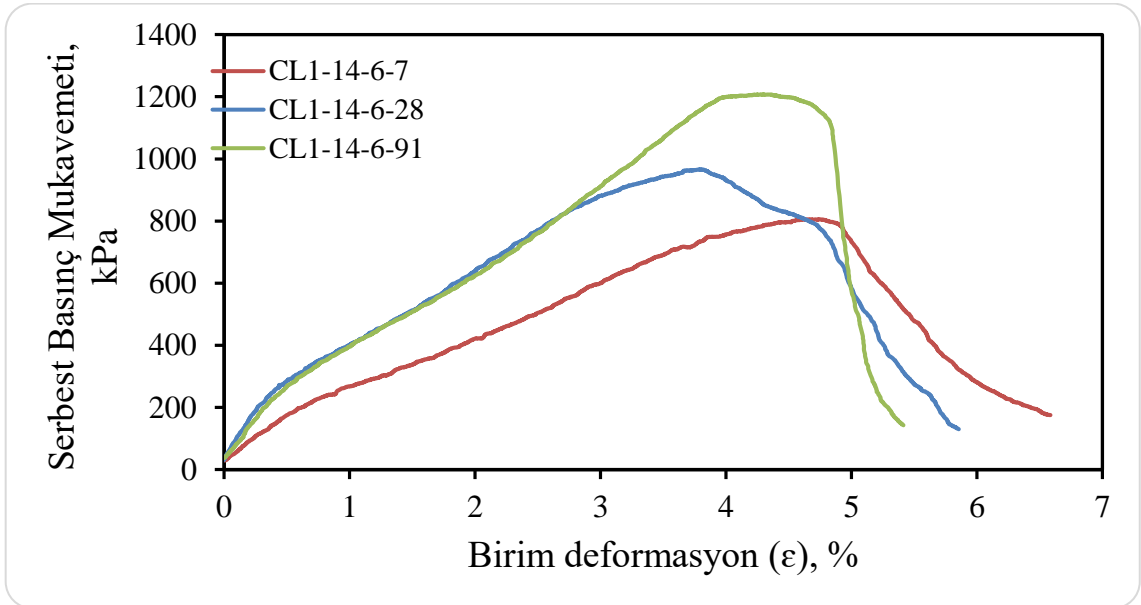
Şekil 4.8: w=%14 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

w=%14 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.8 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 135 kPa iken %2 kireçli numunede 668 kPa, %4 kireçli numunede 746 kPa, %6 kireçli numunede 966 kPa, %8 kireçli numunede 1222 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1410 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



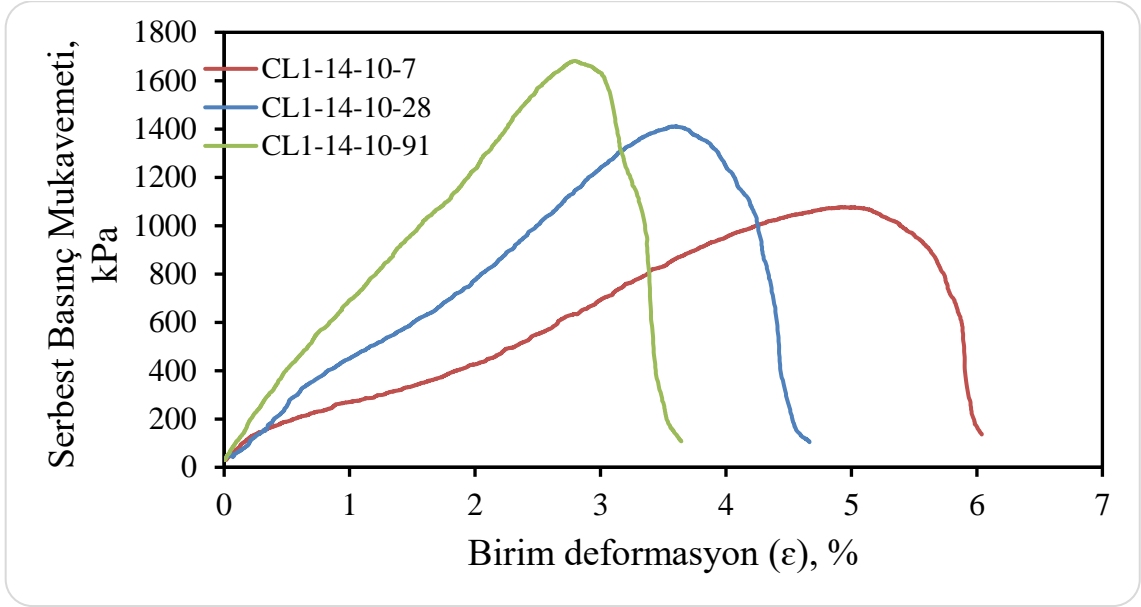
Şekil 4.9: w=%14 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

w=%14 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.9 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 151 kPa iken %2 kireçli numunede 701 kPa, %4 kireçli numunede 921 kPa, %6 kireçli numunede 1207 kPa, %8 kireçli numunede 1303 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1681 kPa dayanım gözlemlenmiştir.

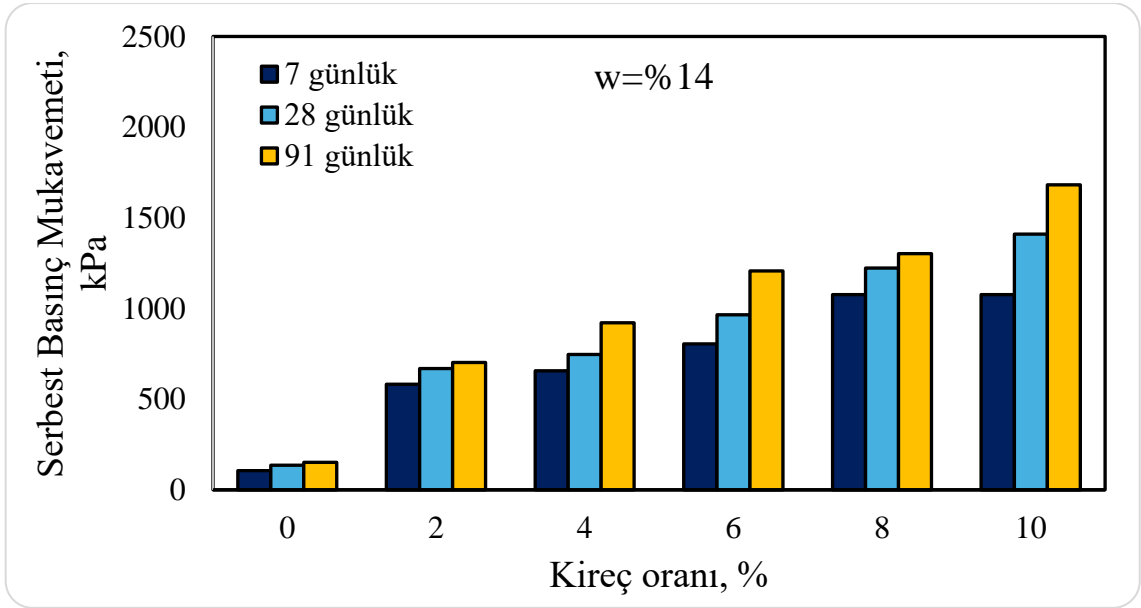


Şekil 4.10: %14 su muhtevalı %6 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%6 sönmüş kireç ve %14 su muhtevalı ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 805 kPa, 28 günlük 966 kPa ve 91 günlük 1207 kPa görülmüştür. Kür süresinin artması ile dayanımın arttığı grafikten de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11: %14 su muhtevalı %10 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı %10 sönmüş kireç ve %14 su muhtevalı ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 1102 kPa, 28 günlük 1410 kPa ve 91 günlük 1681 kPa görülmüştür. Kür süresi ile dayanımın artması ile eğrinin yatıktan daha dik şekilde olduğu birim deformasyonun azaldığı gözlemlenmiştir.

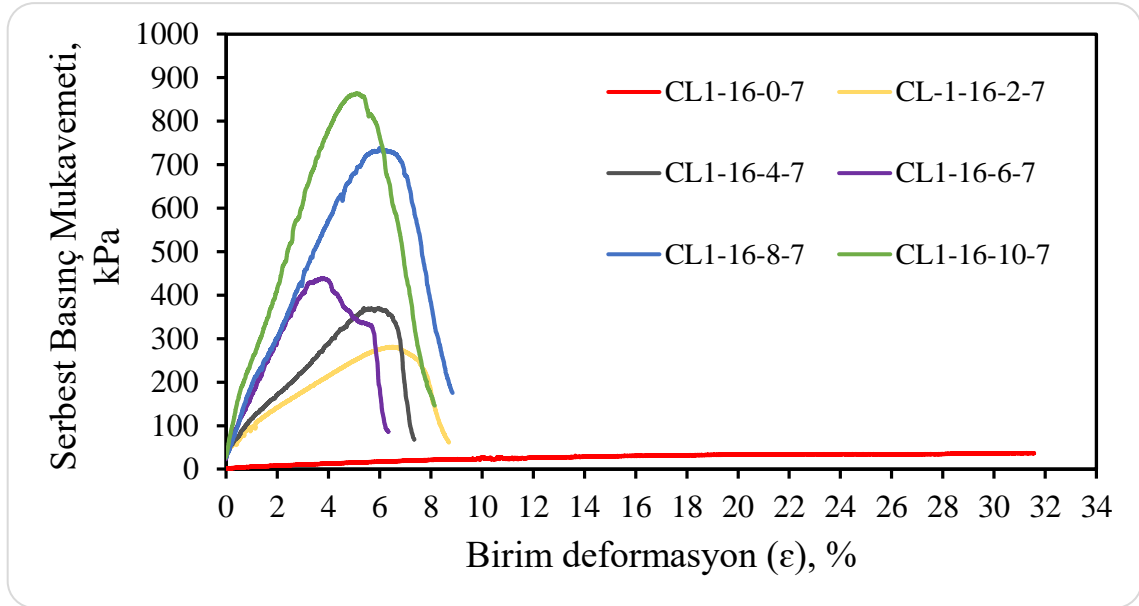


Şekil 4.12: %14 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

w= %14 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.12. gösterilmiş olup kireç oranının artması ile dayanımın arttığı gözlemlenmiştir.

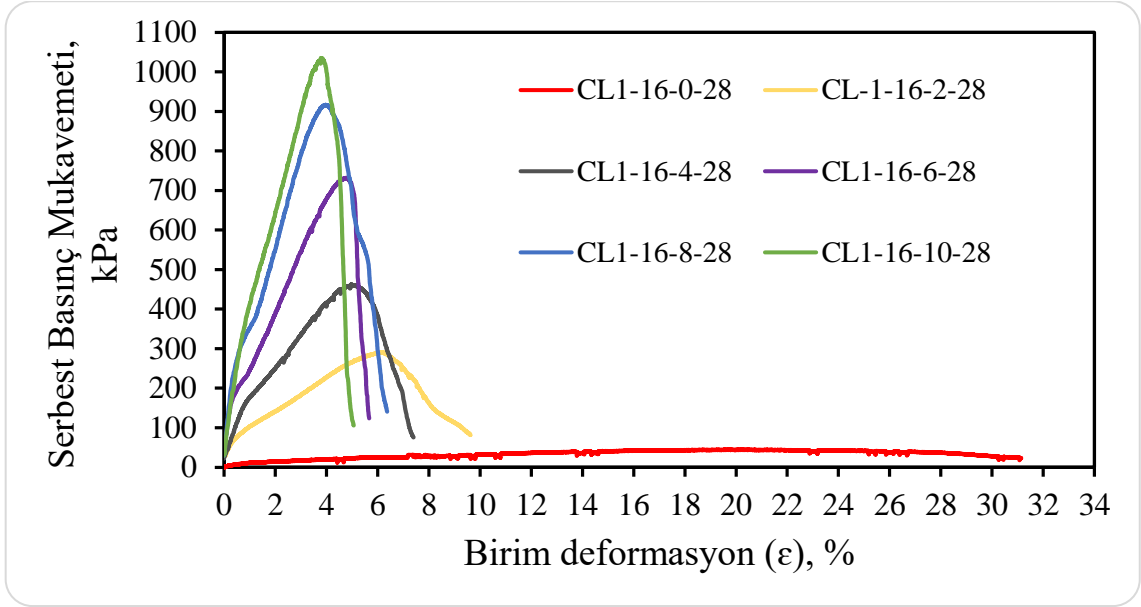
4.3. w= %16 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

%16 su muhtevasına sahip numuneler kireçsiz, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında sönmüş kireç eklenerek hazırlanmış olup her bir kireç oranı için 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük toplamda %16 su muhtevasına sahip 18 numune hazırlanmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir.



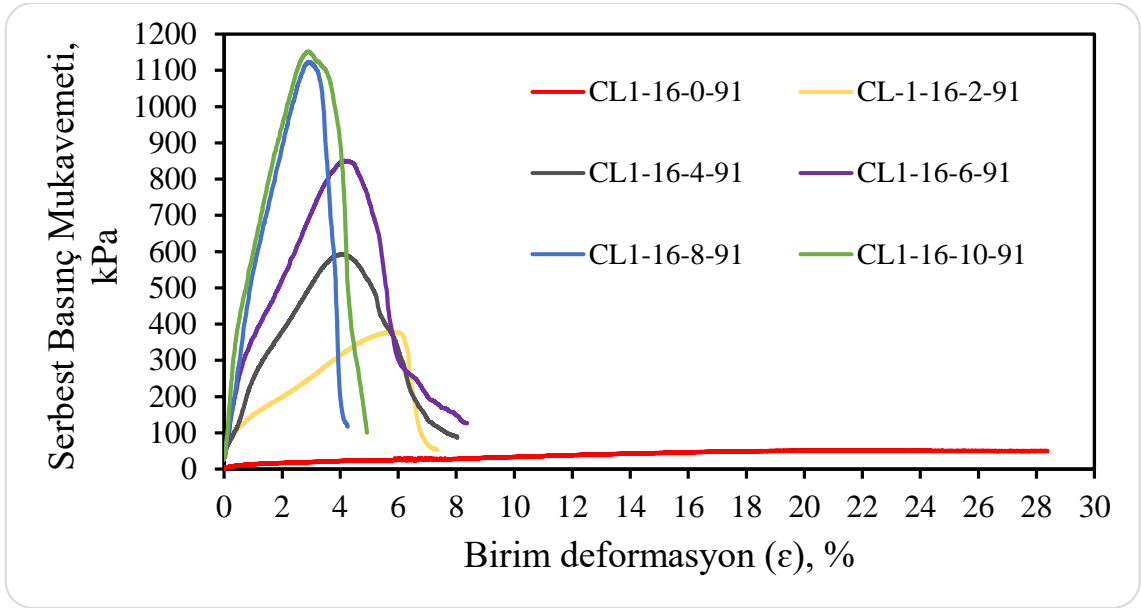
Şekil 4.13: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

%16 su muhtevasına sahip numuneye kireç eklenmeden ve kuru kil miktarının %2, %4, %6 %8 ve %10 oranlarında kireç eklenerek 7 günlük serbest basınç deneyi yapılmış olup gerilme – birim şekil değiştirme grafiği şekil 4.13 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 37 kPa iken %2 kireçli numunede 280 kPa, %4 kireçli numunede 370 kPa, %6 kireçli numunede 438 kPa, %8 kireçli numunede 738 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 863 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



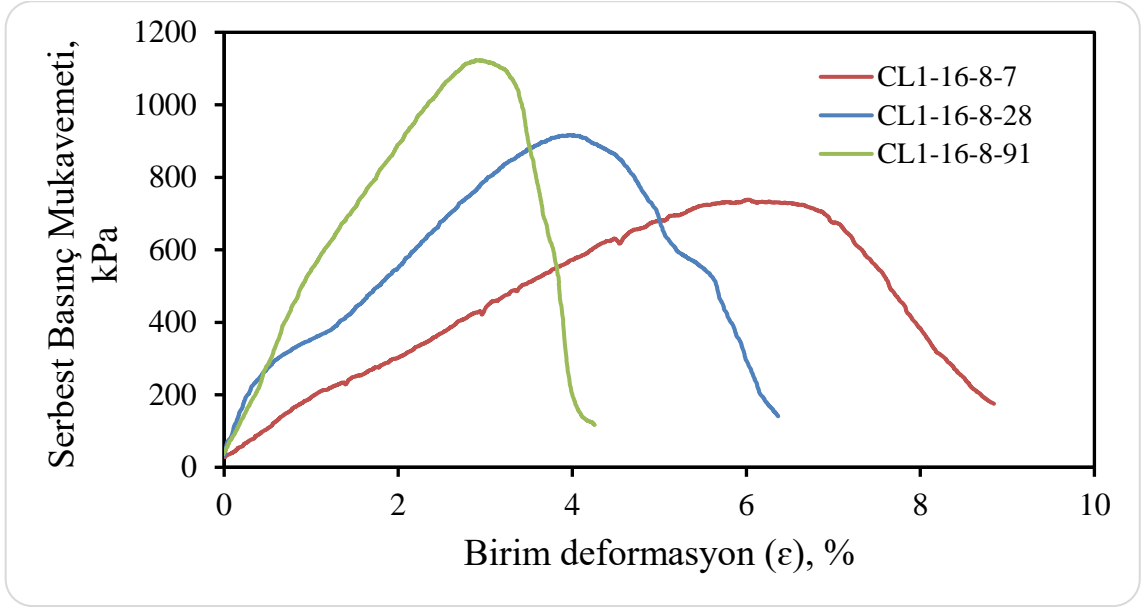
Şekil 4.14: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

w=%16 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.14 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 44 kPa iken %2 kireçli numunede 290 kPa, %4 kireçli numunede 461 kPa, %6 kireçli numunede 732 kPa, %8 kireçli numunede 916 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1035 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



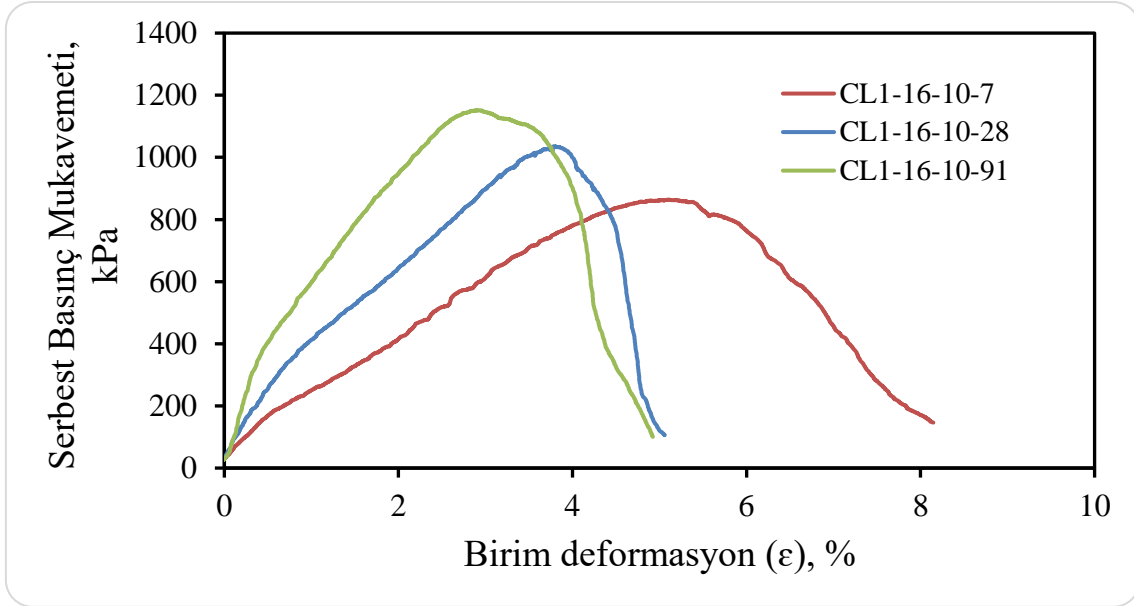
Şekil 4.15: w=%16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

w=%16 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.15 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 51 kPa iken %2 kireçli numunede 378 kPa, %4 kireçli numunede 593 kPa, %6 kireçli numunede 850 kPa, %8 kireçli numunede 1123 ve %10 kireç ile hazırlanan numunede 1151 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



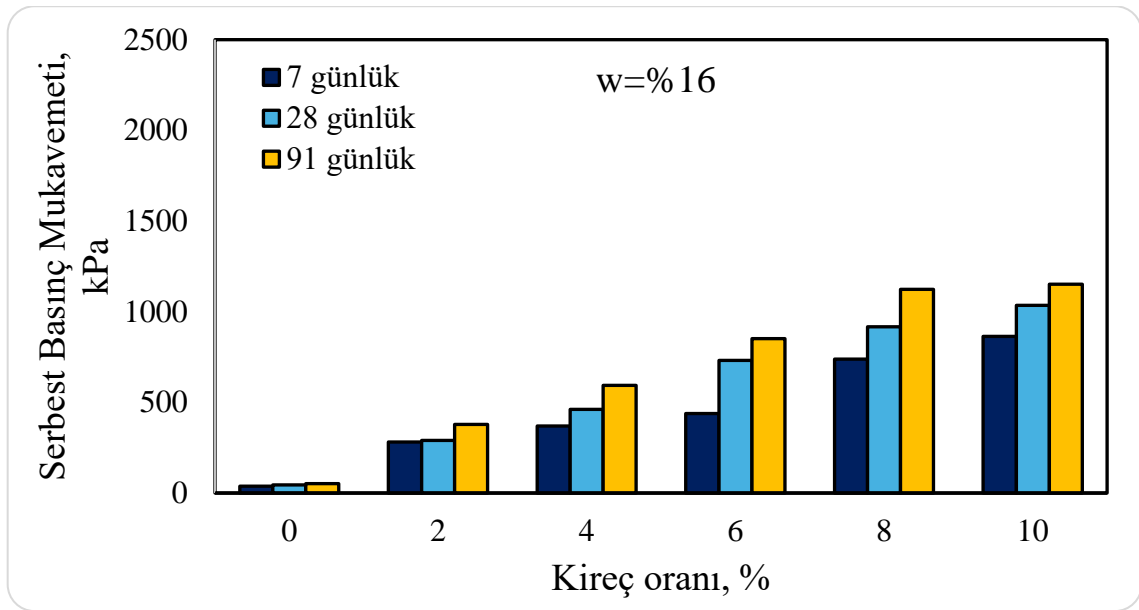
Şekil 4.16: %16 su muhtevalı %8 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%8 sönmüş kireçli ve %16 su muhtevalı ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 738 kPa, 28 günlük 916 kPa ve 91 günlük 1123 kPa görülmüştür.



Şekil 4.17: %16 su muhtevalı %10 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%10 sönmüş kireçli ve %16 su muhtevalı ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 863 kPa, 28 günlük 1035 kPa ve 91 günlük 1151 kPa görülmüştür.

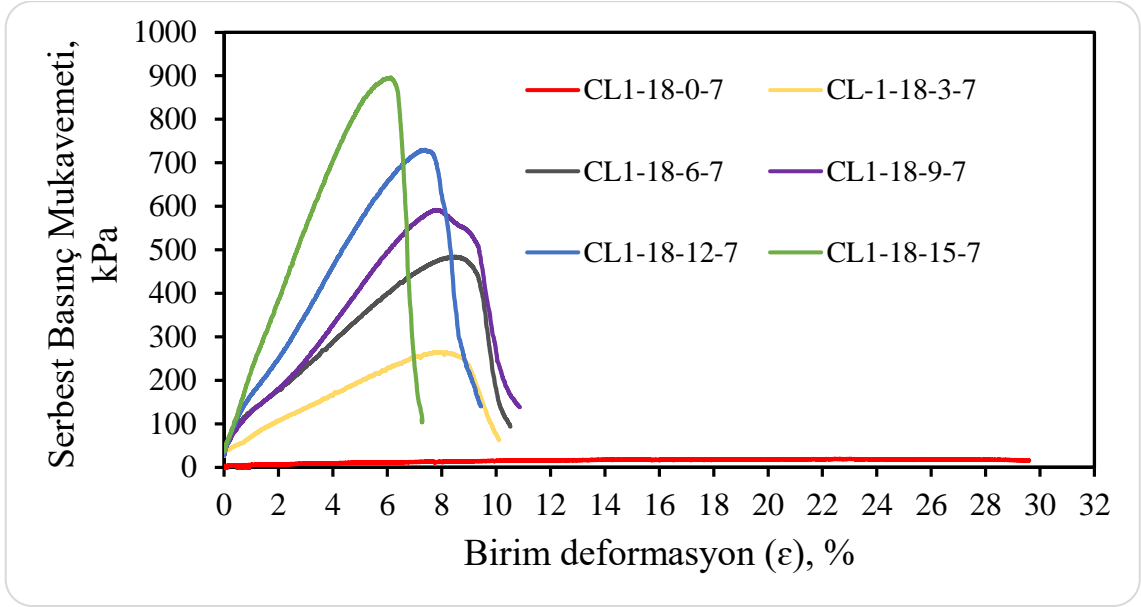


Şekil 4.18: %16 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

w= %16 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.18. gösterilmiş olup kireç oranının artması ile dayanımın arttığı gözlemlenmiştir.%8 kireç oranının bu su muhtevalarında ideal olduğu değerlendirilmiştir.

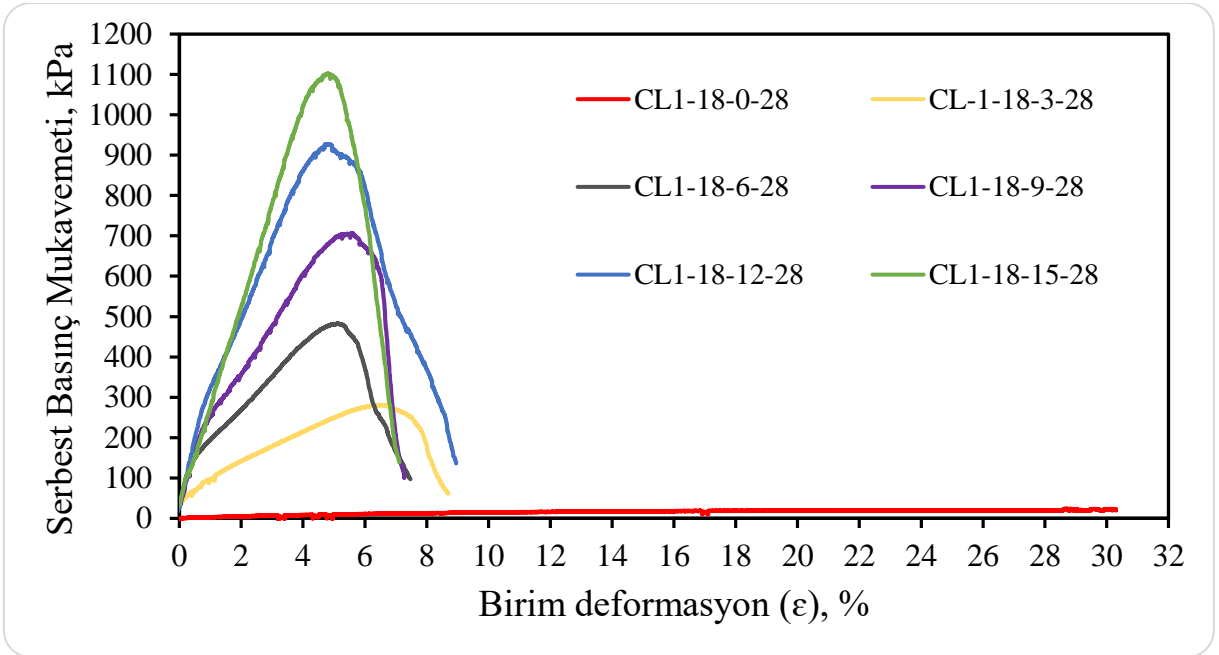
4.4. w= %18 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

Su muhtevalarının artması nedeniyle önceki numunelerden farklı olarak kireç oranları %18 su muhtevaları için %3 oranlarında artırılarak yapılmıştır. W=%18 olan numunelere kireçsiz, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında sönmüş kireç eklenerek hazırlanmış olup kireçsiz numunenin 7 ve 28 günlük olarak 2 numune diğer her bir kireç oranı için 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük toplamda %18 su muhtevalarına sahip 17 numune hazırlanmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir. W=%18 olan numune hazırlanırken kireç katılmadığı numune çok yumuşak kıvamda olduğu, kireç oranının artması ile hazırlanan numunelerin kıvamında sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

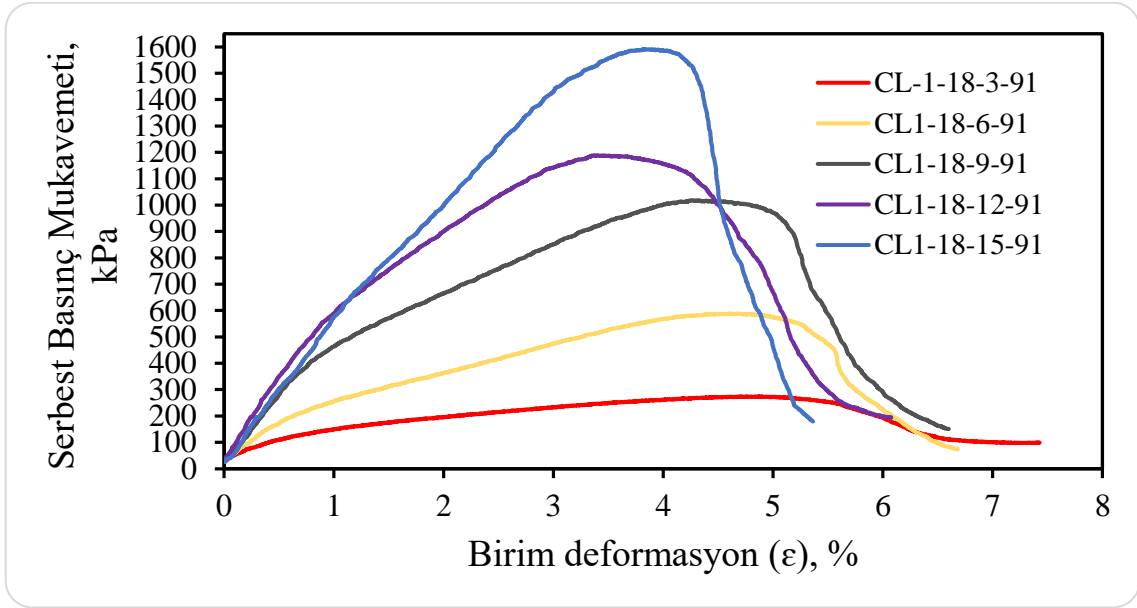
w=%18 olan numunelerin 7 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.19 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 19,5 kPa iken %3 kireçli numunede 264 kPa, %6 kireçli numunede 484 kPa, %9 kireçli numunede 591 kPa, %12 kireçli numunede 730 ve %15 kireç ile hazırlanan numunede 895 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

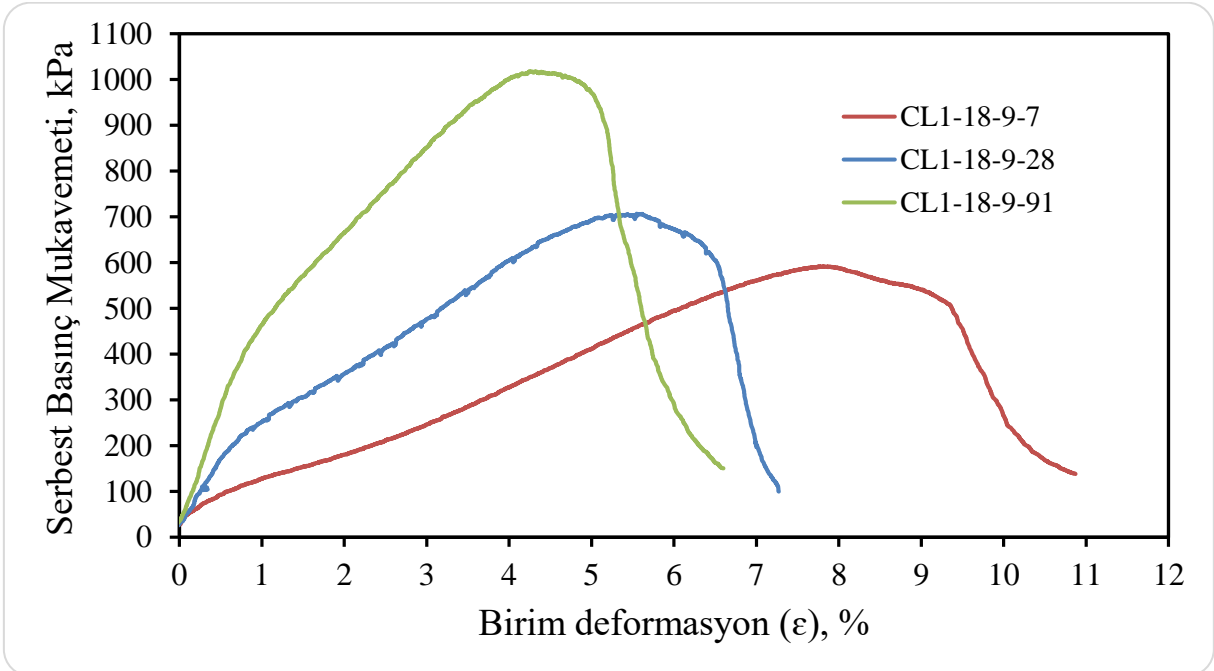
w=%18 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.20 de gösterilmiştir. %0 kireçli numune 20 kPa iken %3 kireçli numunede 281 kPa, %6 kireçli numunede 482 kPa, %9

kireçli numunede 706 kPa, %12 kireçli numunede 927 ve %15 kireç ile hazırlanan numunede 1102 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



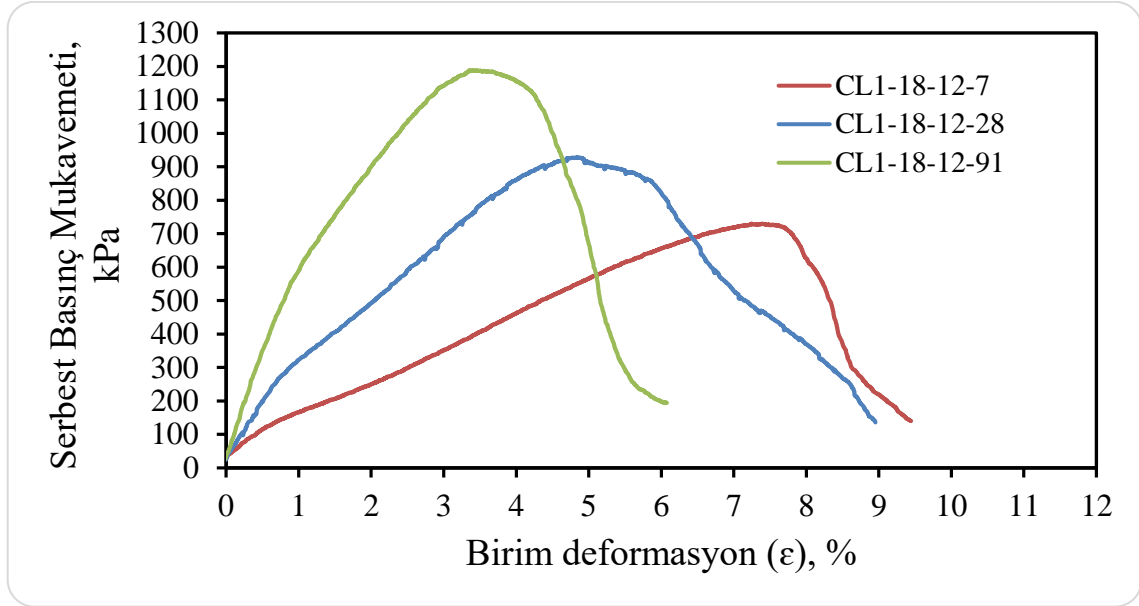
Şekil 4.21: w=%18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

w=%18 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.21 de gösterilmiştir %3 kireçli numunede 274 kPa, %6 kireçli numunede 588 kPa, %9 kireçli numunede 1017 kPa, %12 kireçli numunede 1188 ve %15 kireç ile hazırlanan numunede 1591 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



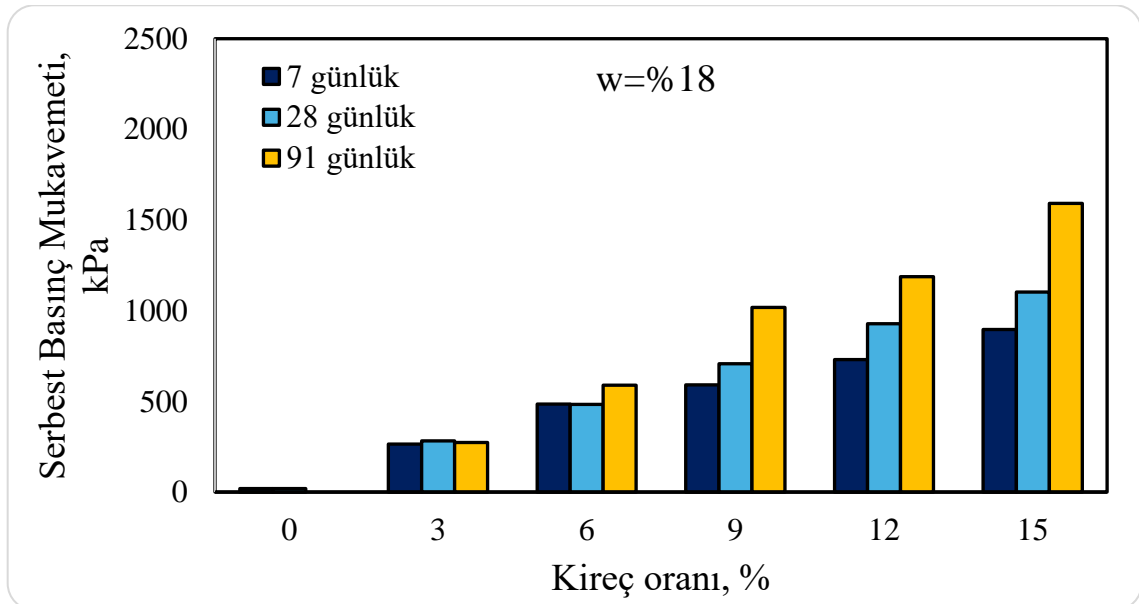
Şekil 4.22: %18 su muhtevalı %9 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%9 sönmüş kireçli ve %18 su muhtevası ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 591 kPa, 28 günlük 706 kPa ve 91 günlük 1017 kPa görülmüştür. Kür süresinin dayanıma ve birim deformasyona etkisi şekil 4.22 de görülmektedir.



Şekil 4.23: %18 su muhtevalı %12 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

%12 sönmüş kireçli ve %18 su muhtevası ile hazırlanan numunenin serbest basınç değerleri 7 günlük 730 kPa, 28 günlük 927 kPa ve 91 günlük 1188 kPa görülmüştür. Kür süresinin dayanıma ve birim deformasyona etkisi şekil 4.23 de görülmektedir.

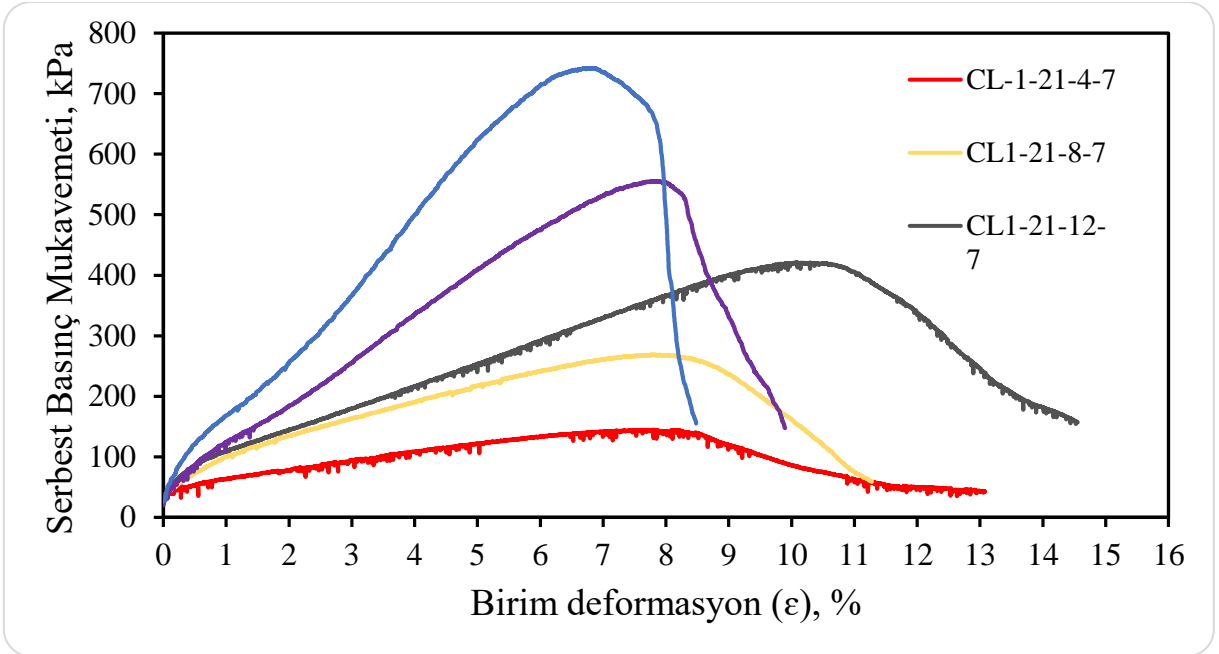


Şekil 4.24: %18 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

w = %18 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.24 de gösterilmiştir.

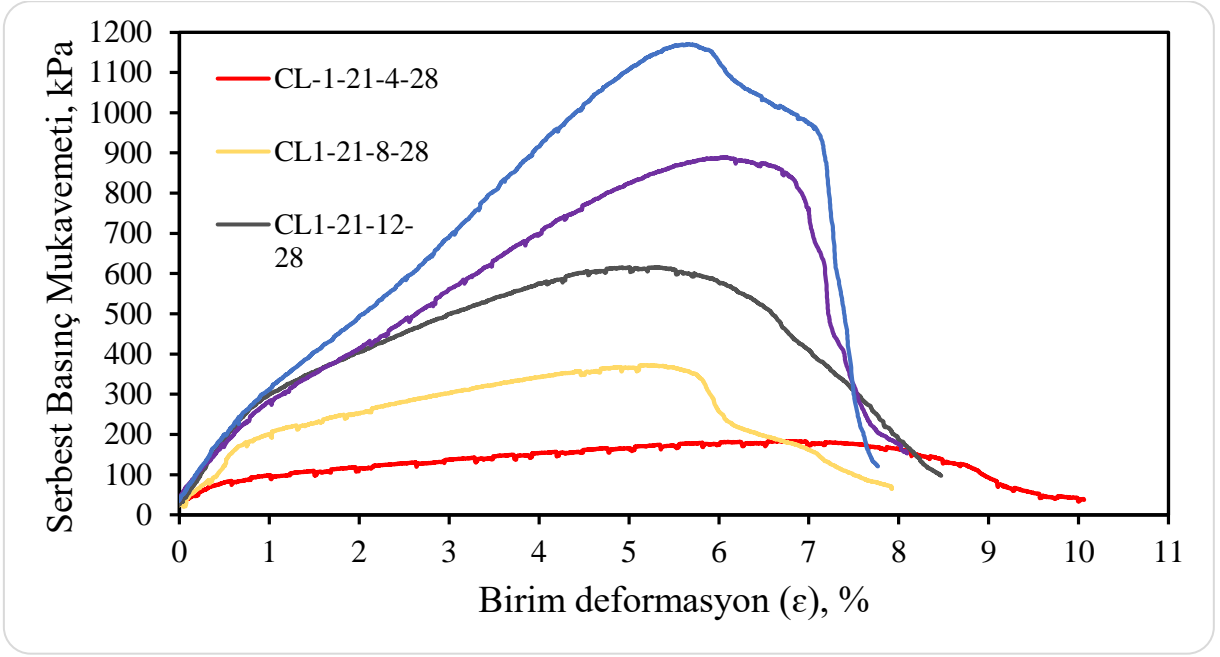
4.5. w= %21 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

w=% 21 olan numuneler hazırlanırken %0 kireçli numune hazırlanamamış olup %4, %8, %12, %16 ve %20 oranlarında sönmüş kireç eklenerek numune hazırlanmıştır.. Her bir kireç oranı için 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük toplamda %21 su muhtevasına sahip 15 numune hazırlanmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir. Su muhtevasının yüksek olması nedeniyle grafiklerdeki eğrilerin önceki su muhteva eğrilerine göre daha yatık olduğu gözlemlenmiştir.



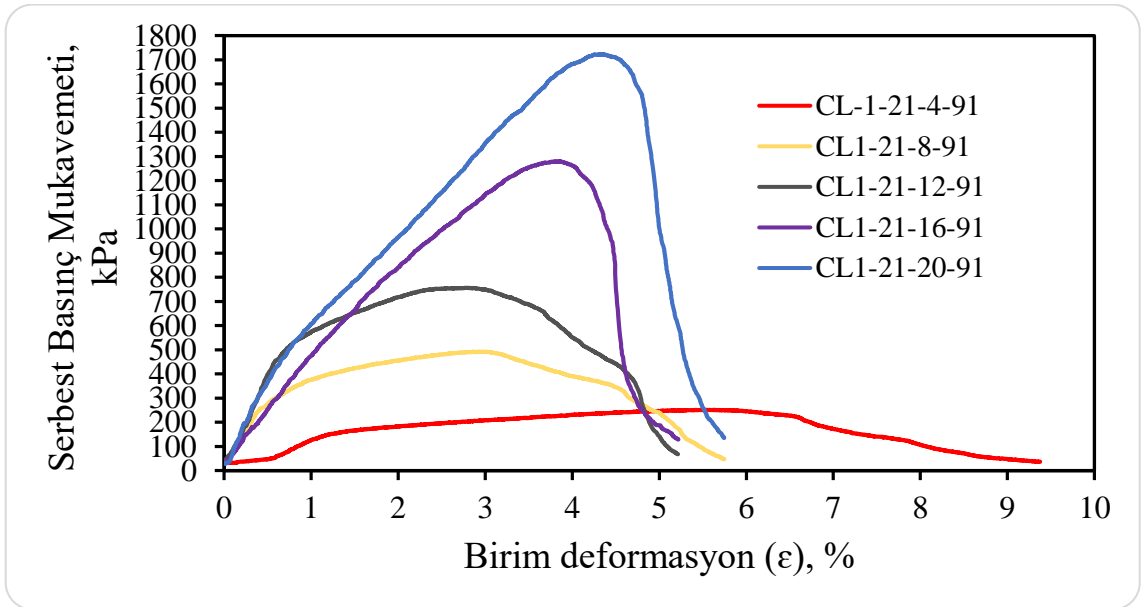
Şekil 4.25: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

w=%21 olan numunelerin 7 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.25 de gösterilmiştir %4 kireçli numunede 144 kPa, %8 kireçli numunede 269 kPa, %12 kireçli numunede 421 kPa, %16 kireçli numunede 555 ve %20 kireç ile hazırlanan numunede 742 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

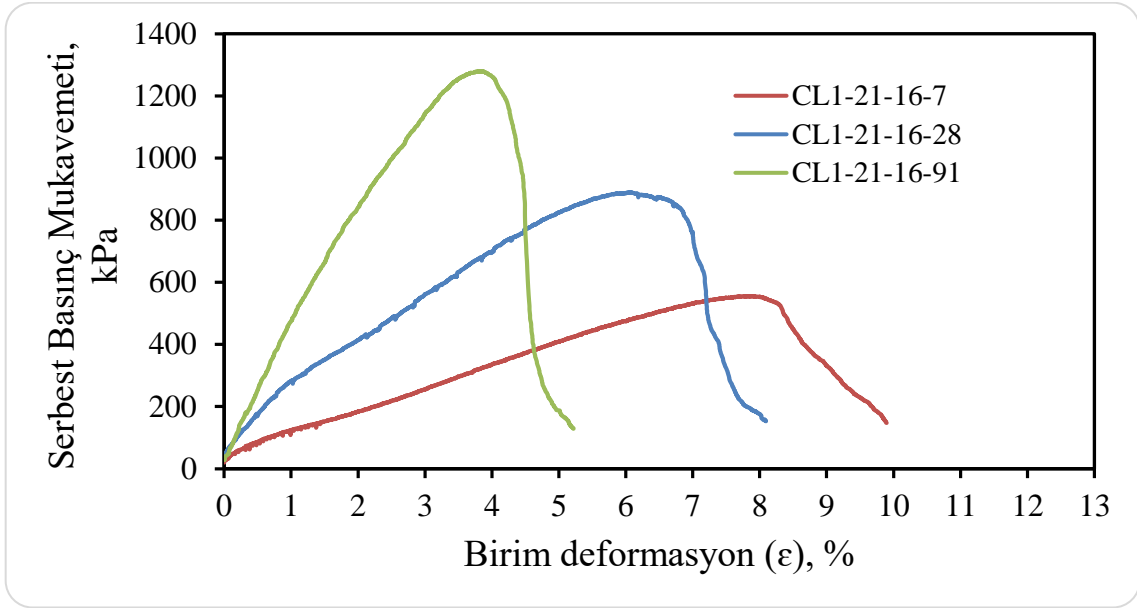
w=%21 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.26 de gösterilmiştir %4 kireçli numunede 183 kPa, %8 kireçli numunede 372 kPa, %12 kireçli numunede 615 kPa, %16 kireçli numunede 889 ve %20 kireç ile hazırlanan numunede 1170 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



Şekil 4.27: w=%21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

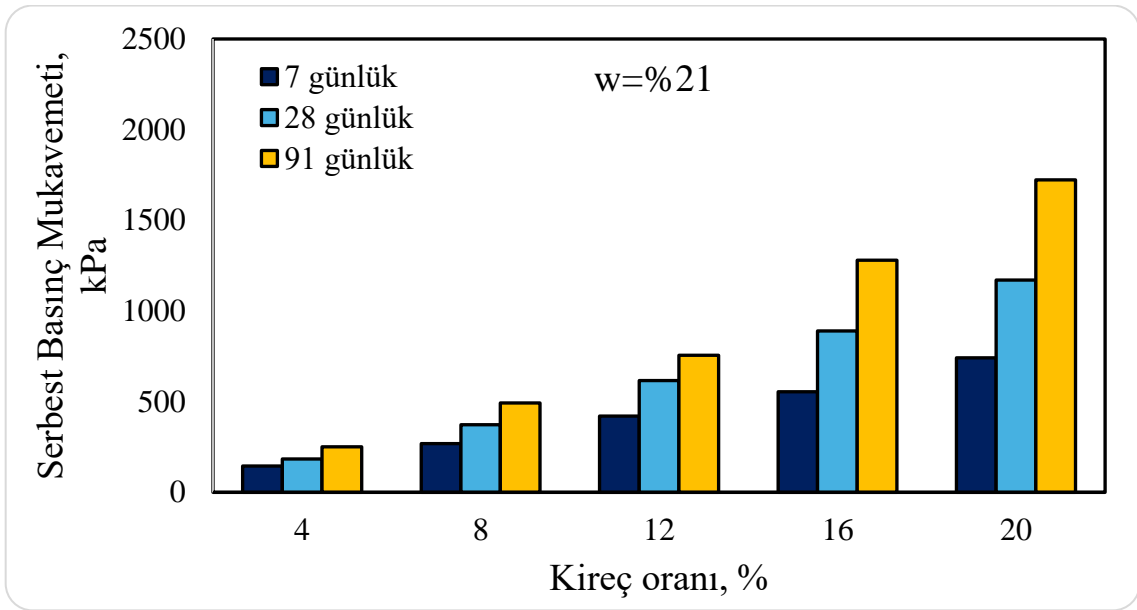
w=%21 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.27 de gösterilmiştir %4 kireçli numunede 251 kPa, %8 kireçli numunede 492 kPa, %12 kireçli numunede 756

kPa, %16 kireçli numunede 1280 ve %20 kireç ile hazırlanan numunede 1722 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28: %21 su muhtevalı %16 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

Kür süresinin dayanıma ve birim deformasyona etkisi şekil 4.28 den anlaşılmaktadır.

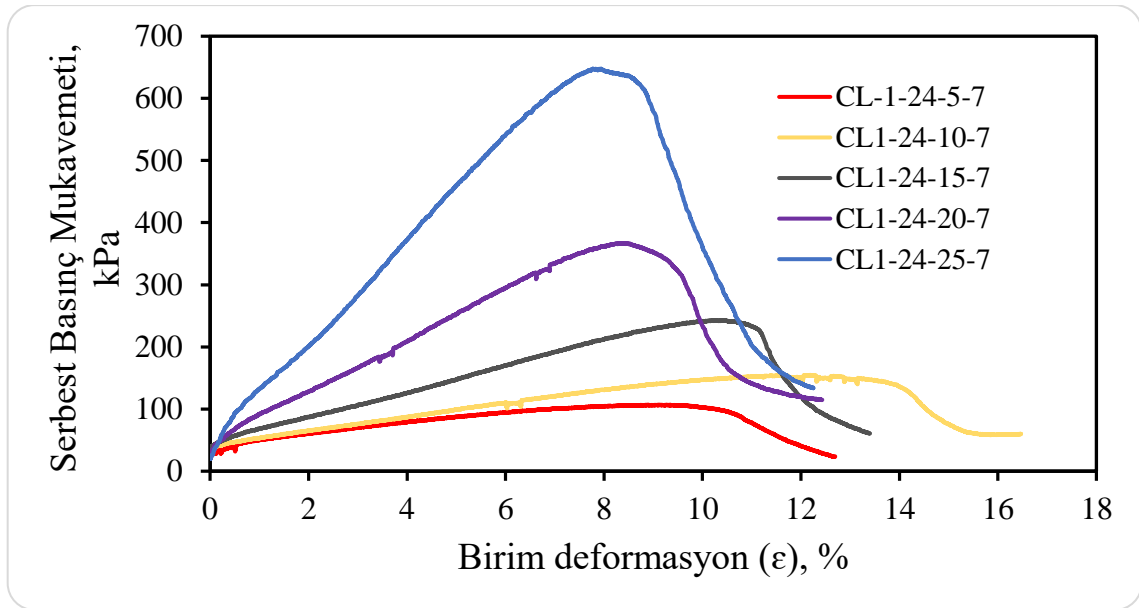


Şekil 4.29: %21 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

w = %21 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.29 de gösterilmiştir.

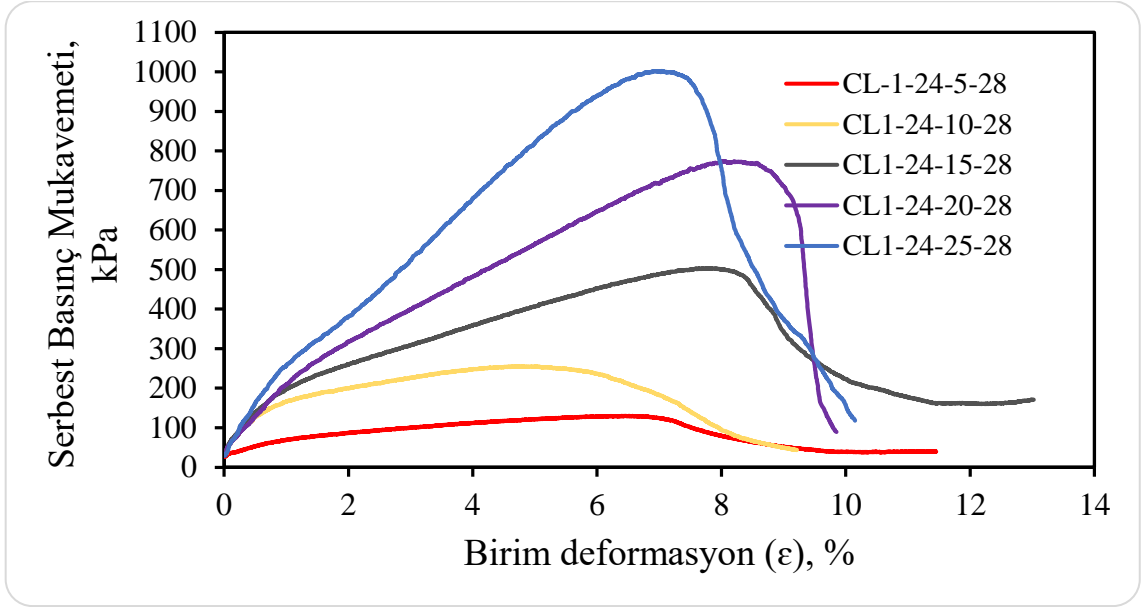
4.6. w= %24 Olan Kireç İle Stabilize Edilen Numunelerin UCS Değerleri (Deney Sonuçları)

% 24 su muhtevasına sahip numuneler %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında sönmüş kireç eklenerek hazırlanmış olup kireçsiz numune hazırlanamamıştır. Her bir kireç oranı için 7 günlük, 28 günlük ve 91 günlük toplamda %24 su muhtevasına sahip 15 numune hazırlanmıştır. Her bir kireç oranına bağlı olarak elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir.



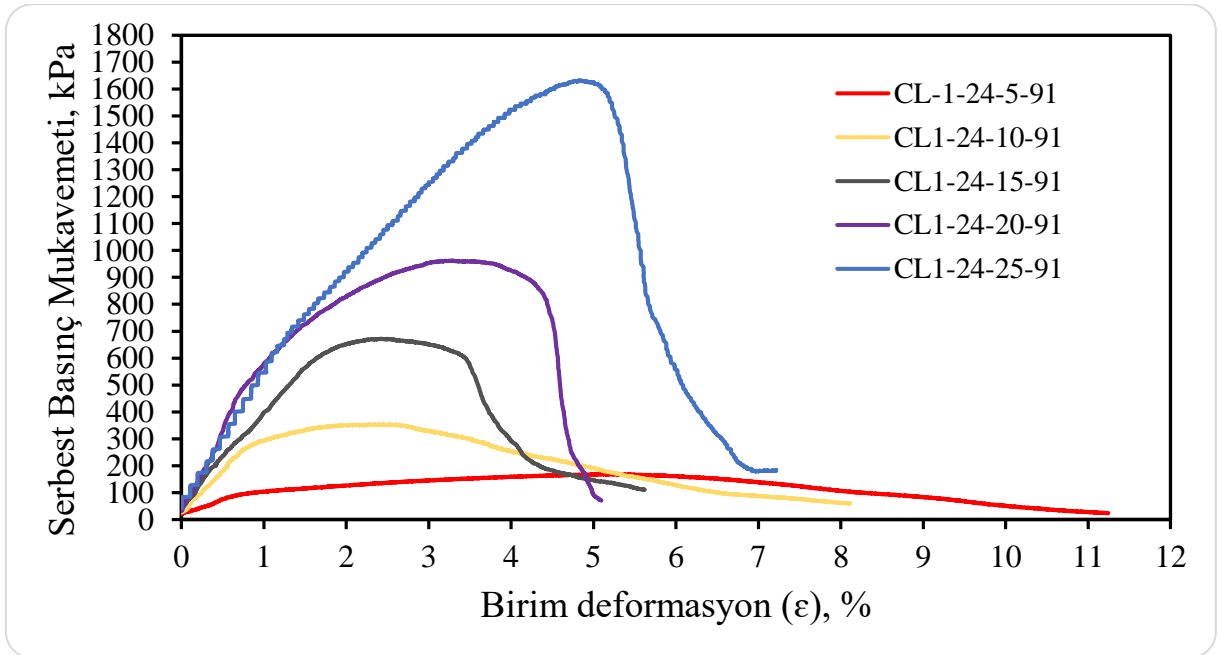
Şekil 4.30: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 7 günlük dayanımı

w=%24 olan numunelerin 7 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.30 da gösterilmiştir %5 kireçli numunede 106 kPa, %10 kireçli numunede 155 kPa, %15 kireçli numunede 242 kPa, %20 kireçli numunede 367 ve %25 kireç ile hazırlanan numunede 647 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



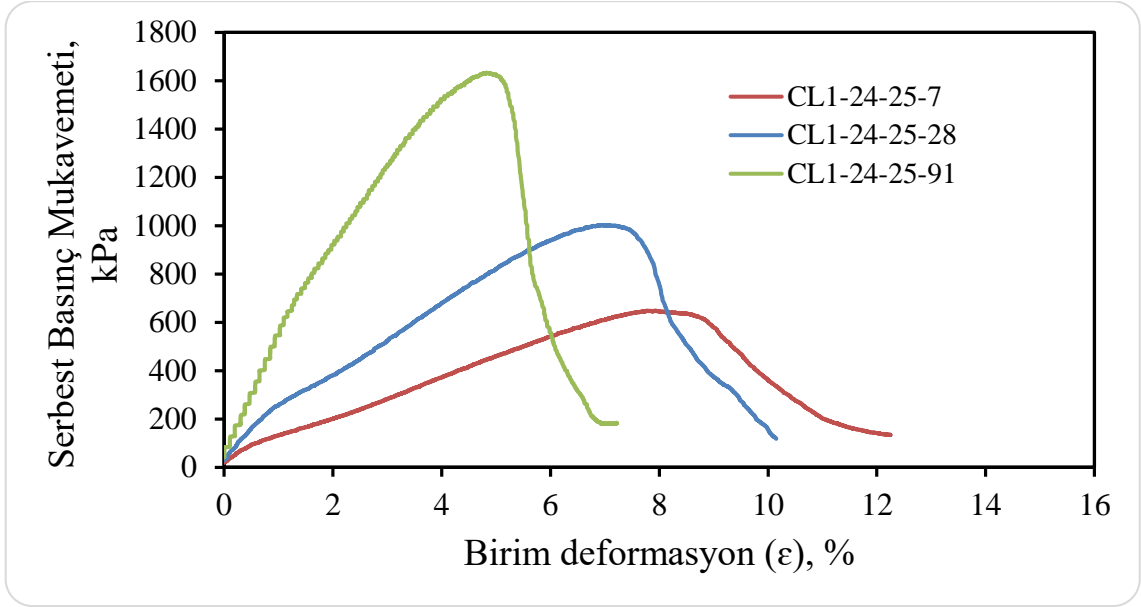
Şekil 4.31: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 28 günlük dayanımı

w=%24 olan numunelerin 28 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.31 de gösterilmiştir %5 kireçli numunede 130 kPa, %10 kireçli numunede 255 kPa, %15 kireçli numunede 503 kPa, %20 kireçli numunede 774 ve %25 kireç ile hazırlanan numunede 1002 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



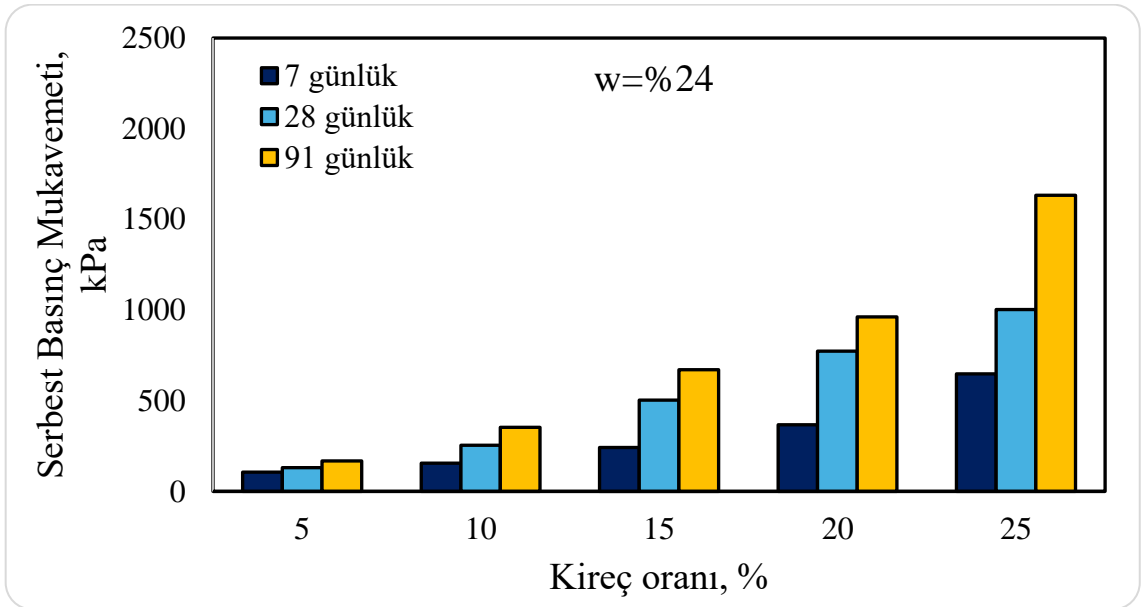
Şekil 4.32: w=%24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin 91 günlük dayanımı

w=%24 olan numunelerin 91 günlük serbest basınç grafiği şekil 4.32 de gösterilmiştir %5 kireçli numunede 168 kPa, %10 kireçli numunede 353 kPa, %15 kireçli numunede 671 kPa, %20 kireçli numunede 962 ve %25 kireç ile hazırlanan numunede 1632 kPa dayanım gözlemlenmiştir.



Şekil 4.33: %24 su muhtevalı %25 sönmüş kireçli numunelerin 7,28 ve 91 günlük dayanımı

Kür süresinin dayanıma ve birim deformasyona etkisi şekil 4.23 den anlaşılmaktadır.

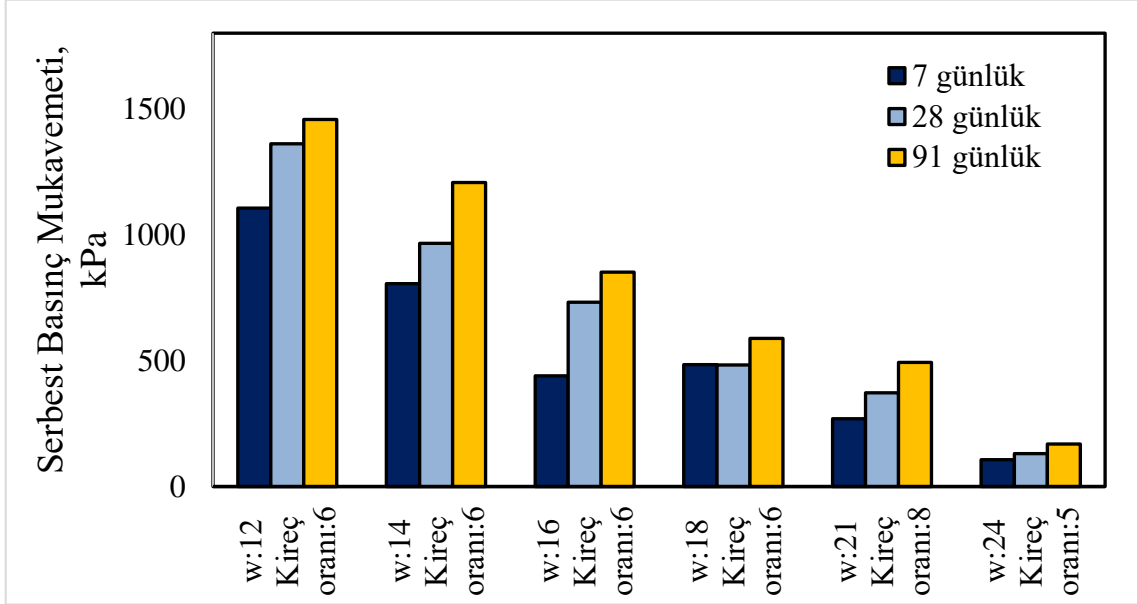


Şekil 4.34: %24 su muhtevalı numunelerin serbest basınç dayanımları

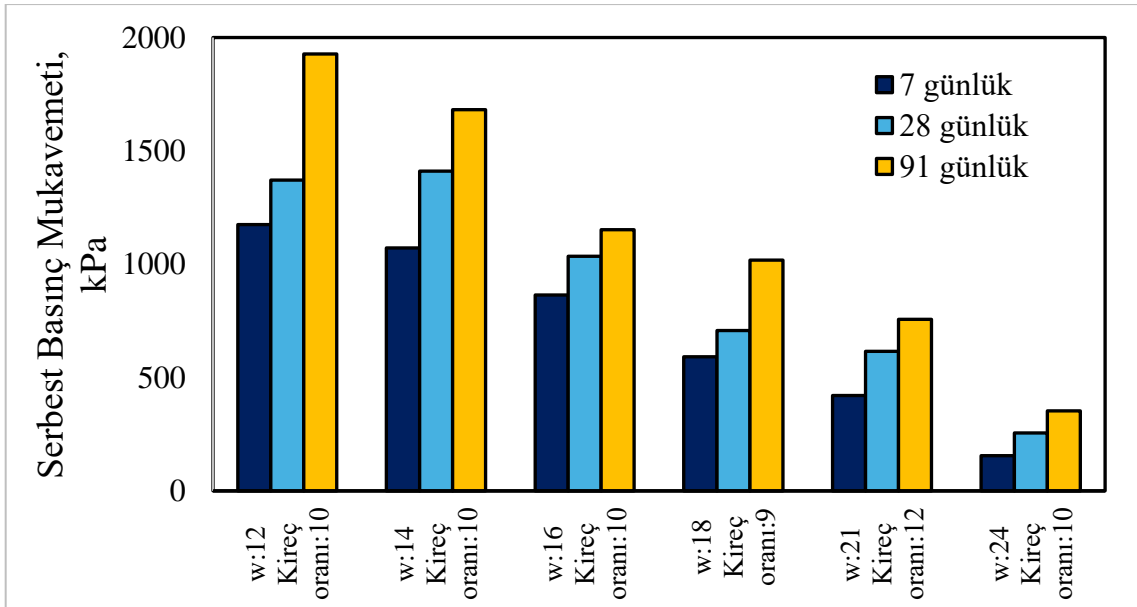
w = %24 olan kireç ile stabilize edilen numunelerin UCS değerlerini gösteren genel grafik şekil 4.34 de gösterilmiştir.

4.7. Karşılaştırmalı Serbest Basınç Deney Sonuçları

Şekil 4.35 ve şekil 4.36 da bulunan grafiklerde farklı su muhtevalarında aynı oranlarda kirecin dayanım üzerinde ki etkisini gösteren grafikler gösterilmiştir.



Şekil 4.35: UCS değerleri karşılaştırmalı



Şekil 4.36: UCS değerleri karşılaştırmalı

4.8. Numunelerin Deney Öncesi ve Sonrası Verileri

Tablo 4.1: Numunelerin deney öncesi ve sonrası verileri

Numune Adı	Kireç Oranı (%)	Hedef Su Muhtevası(%)	Başlangıç Su Muhtevası (%)	Deney Sonu Su Muhtevası(%)	Deney Başı ın	Deney Sonu ın
CL-1-12-0-7	0	12	11,70	11,46	2,27	2,27
CL-1-12-0-28	0	12	11,70	11,60	2,31	2,31
CL-1-12-0-91	0	12	11,70	11,16	2,31	2,30
CL-1-12-2-7	2	12	12,00	11,77	2,33	2,33
CL-1-12-2-28	2	12	12,00	11,29	2,28	2,28
CL-1-12-2-91	2	12	12,00	11,56	2,31	2,30
CL-1-12-4-7	4	12	11,79	11,64	2,30	2,30
CL-1-12-4-28	4	12	11,79	11,12	2,29	2,29
CL-1-12-4-91	4	12	11,79	11,25	2,29	2,28
CL-1-12-6-7	6	12	11,07	10,61	2,29	2,29
CL-1-12-6-28	6	12	11,07	10,73	2,28	2,28
CL-1-12-6-91	6	12	11,07	10,63	2,26	2,25
CL-1-12-8-7	8	12	10,72	10,67	2,30	2,30
CL-1-12-8-28	8	12	10,72	10,42	2,26	2,26
CL-1-12-8-91	8	12	10,72	10,06	2,31	2,30
CL-1-12-10-7	10	12	10,33	9,21	2,30	2,30
CL-1-12-10-28	10	12	10,33	9,75	2,31	2,31
CL-1-12-10-91	10	12	10,33	10,01	2,32	2,31
CL-1-14-0-7	0	14	14,50	13,56	2,25	2,25
CL-1-14-0-28	0	14	14,50	13,90	2,20	2,19
CL-1-14-0-91	0	14	14,50	13,78	2,23	2,22
CL-1-14-2-7	2	14	13,66	12,72	2,26	2,26
CL-1-14-2-28	2	14	13,66	13,33	2,26	2,25
CL-1-14-2-91	2	14	13,66	13,26	2,26	2,26
CL-1-14-4-7	4	14	13,93	13,60	2,23	2,23
CL-1-14-4-28	4	14	13,93	13,75	2,24	2,23
CL-1-14-4-91	4	14	13,93	13,13	2,29	2,28
CL-1-14-6-7	6	14	13,59	13,59	2,23	2,22
CL-1-14-6-28	6	14	13,59	13,59	2,20	2,20
CL-1-14-6-91	6	14	13,59	12,92	2,26	2,25
CL-1-14-8-7	8	14	13,66	13,29	2,22	2,22
CL-1-14-8-28	8	14	13,66	13,19	2,22	2,22
CL-1-14-8-91	8	14	13,66	12,50	2,23	2,22
CL-1-14-10-7	10	14	13,44	13,03	2,22	2,22
CL-1-14-10-28	10	14	13,44	13,07	2,24	2,24
CL-1-14-10-91	10	14	13,44	12,44	2,24	2,23

Tablo 4.1 (devamı): Numunelerin deney öncesi ve sonrası verileri

Numune Adı	Kireç Oranı (%)	Hedef Su Muhtevası(%)	Başlangıç Su Muhtevası (%)	Deney Sonu Su Muhtevası (%)	Deney Başı ın	Deney Sonu ın
CL-1-16-0-7	0	16	16,43	16,32	2,19	2,19
CL-1-16-0-28	0	16	16,43	16,04	2,21	2,21
CL-1-16-0-91	0	16	16,43	15,83	2,25	2,24
CL-1-16-2-7	2	16	16,16	15,77	2,25	2,25
CL-1-16-2-28	2	16	16,16	15,82	2,24	2,24
CL-1-16-2-91	2	16	16,16	15,27	2,24	2,23
CL-1-16-4-7	4	16	16,00	15,44	2,26	2,26
CL-1-16-4-28	4	16	16,00	15,39	2,25	2,25
CL-1-16-4-91	4	16	16,00	14,88	2,25	2,25
CL-1-16-6-7	6	16	15,59	15,28	2,24	2,24
CL-1-16-6-28	6	16	15,59	15,42	2,26	2,26
CL-1-16-6-91	6	16	15,59	14,98	2,26	2,26
CL-1-16-8-7	8	16	15,47	14,97	2,25	2,25
CL-1-16-8-28	8	16	15,47	14,95	2,26	2,26
CL-1-16-8-91	8	16	15,47	14,53	2,22	2,22
CL-1-16-10-7	10	16	14,62	14,38	2,22	2,22
CL-1-16-10-28	10	16	14,62	14,42	2,23	2,23
CL-1-16-10-91	10	16	14,62	13,56	2,23	2,23
CL-1-18-0-7	0	18	18,83	18,14	2,23	2,23
CL-1-18-0-28	0	18	18,83	18,14	2,31	2,31
CL-1-18-3-7	3	18	17,67	17,24	2,22	2,22
CL-1-18-3-28	3	18	17,67	17,36	2,23	2,22
CL-1-18-3-91	3	18	17,67	17,00	2,23	2,23
CL-1-18-6-7	6	18	17,00	16,89	2,25	2,25
CL-1-18-6-28	6	18	17,00	16,72	2,24	2,23
CL-1-18-6-91	6	18	17,00	16,32	2,24	2,24
CL-1-18-9-7	9	18	16,20	16,07	2,21	2,21
CL-1-18-9-28	9	18	16,20	16,10	2,21	2,21
CL-1-18-9-91	9	18	16,20	15,77	2,19	2,19
CL-1-18-12-7	12	18	15,75	15,82	2,20	2,20
CL-1-18-12-28	12	18	15,75	15,29	2,22	2,21
CL-1-18-12-91	12	18	15,75	15,28	2,21	2,20
CL-1-18-15-7	15	18	15,47	15,31	2,21	2,21
CL-1-18-15-28	15	18	15,47	15,20	2,20	2,20
CL-1-18-15-91	15	18	15,47	14,98	2,20	2,19

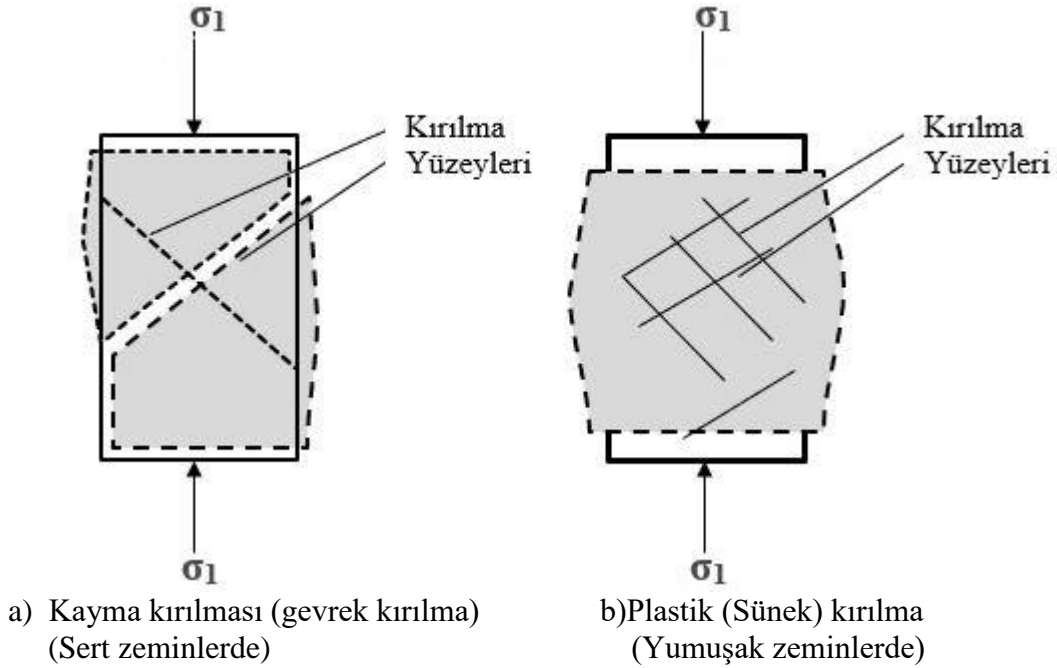
Tablo 4.1 (devamı): Numunelerin deney öncesi ve sonrası verileri

Numune Adı	Kireç Oranı (%)	Hedef Su Muhtevası(%)	Başlangıç Su Muhtevası (%)	Deney Sonu Su Muhtevası (%)	Deney Başı ın	Deney Sonu ın
CL-1-21-4-7	4	21	20,21	19,66	2,19	2,19
CL-1-21-4-28	4	21	20,21	20,07	2,14	2,14
CL-1-21-4-91	4	21	20,21	19,47	2,18	2,17
CL-1-21-8-7	8	21	19,28	18,60	2,18	2,19
CL-1-21-8-28	8	21	19,28	18,95	2,19	2,19
CL-1-21-8-91	8	21	19,28	18,69	2,20	2,19
CL-1-21-12-7	12	21	18,61	18,09	2,19	2,19
CL-1-21-12-28	12	21	18,61	18,30	2,18	2,18
CL-1-21-12-91	12	21	18,61	18,13	2,17	2,17
CL-1-21-16-7	16	21	17,76	17,36	2,18	2,18
CL-1-21-16-28	16	21	17,76	17,61	2,18	2,18
CL-1-21-16-91	16	21	17,76	17,04	2,19	2,19
CL-1-21-20-7	20	21	16,98	16,83	2,19	2,19
CL-1-21-20-28	20	21	16,98	16,79	2,18	2,18
CL-1-21-20-91	20	21	16,98	16,50	2,19	2,19
CL-1-24-5-7	5	24	22,62	22,03	2,14	2,14
CL-1-24-5-28	5	24	22,62	21,16	2,10	2,10
CL-1-24-5-91	5	24	22,62	22,12	2,13	2,13
CL-1-24-10-7	10	24	21,68	21,56	2,13	2,13
CL-1-24-10-28	10	24	21,68	20,11	2,13	2,13
CL-1-24-10-91	10	24	21,68	20,93	2,14	2,13
CL-1-24-15-7	15	24	20,74	20,60	2,14	2,14
CL-1-24-15-28	15	24	20,74	19,51	2,12	2,12
CL-1-24-15-91	15	24	20,74	19,53	2,13	2,13
CL-1-24-20-7	20	24	19,60	19,69	2,14	2,13
CL-1-24-20-28	20	24	19,60	18,02	2,14	2,14
CL-1-24-20-91	20	24	19,60	18,78	2,14	2,13
CL-1-24-25-7	25	24	18,70	18,23	2,14	2,14
CL-1-24-25-28	25	24	18,70	18,02	2,13	2,13
CL-1-24-25-91	25	24	18,70	17,62	2,13	2,13

4.9. Numunelerin Serbest Basınç Deney Sonrası Kırılma Fotoları

Su muhtevasının ve kireç oranının değişiklikleri ile numune üzerinde gerçekleşen farklı kırılma tipleri aşağıdaki tablolarda gözlemlenmektedir. Tablo 4.2. 7 günlük numunelerin, Tablo 4.3. 28 günlük numunelerin, Tablo 4.4. 91 günlük numunelerin gözlemlenen kırılma mekanizmasının görüntülerini sunmaktadır. Tablolarda bulunan numune kırılma fotoları incelendiğinde kırılma modelinin belirgin şekilde farklı olduğunu ve öncelikle numunelerin kireç eklenmesi ile değişim gösterdiği açıkça gözlemlenmiştir. Kireç eklenmeden hazırlanan numunelerde yumuşak zeminlerde gözlemlenen plastik kırılma davranışı görülmüş; şişme ve düzensiz yanal genişleme gözlemlenmiştir. Kireç eklenerek yapılan deneylerde sert zeminlerde görülen diyagonal kırılma gözlemlenmiştir.

Yüksek mukavemet değeri gösteren numunelerin kırılma tipleri incelendiğinde, numunenin üst veya alt ucunda konik bir yarığın kırıldığı gözlemlenmiştir. Su muhtevasının yüksek olduğu numunelerde ise, ağırlıklı olarak kayma hatası şeklinde bir öteleme kırılması gözlemlenmiştir.



Şekil 4.37: Değişik kırılma biçimleri

Tablo 4.2: 7 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları



Tablo 4.2(Devamı): 7 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları



Tablo 4.3: 28 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları



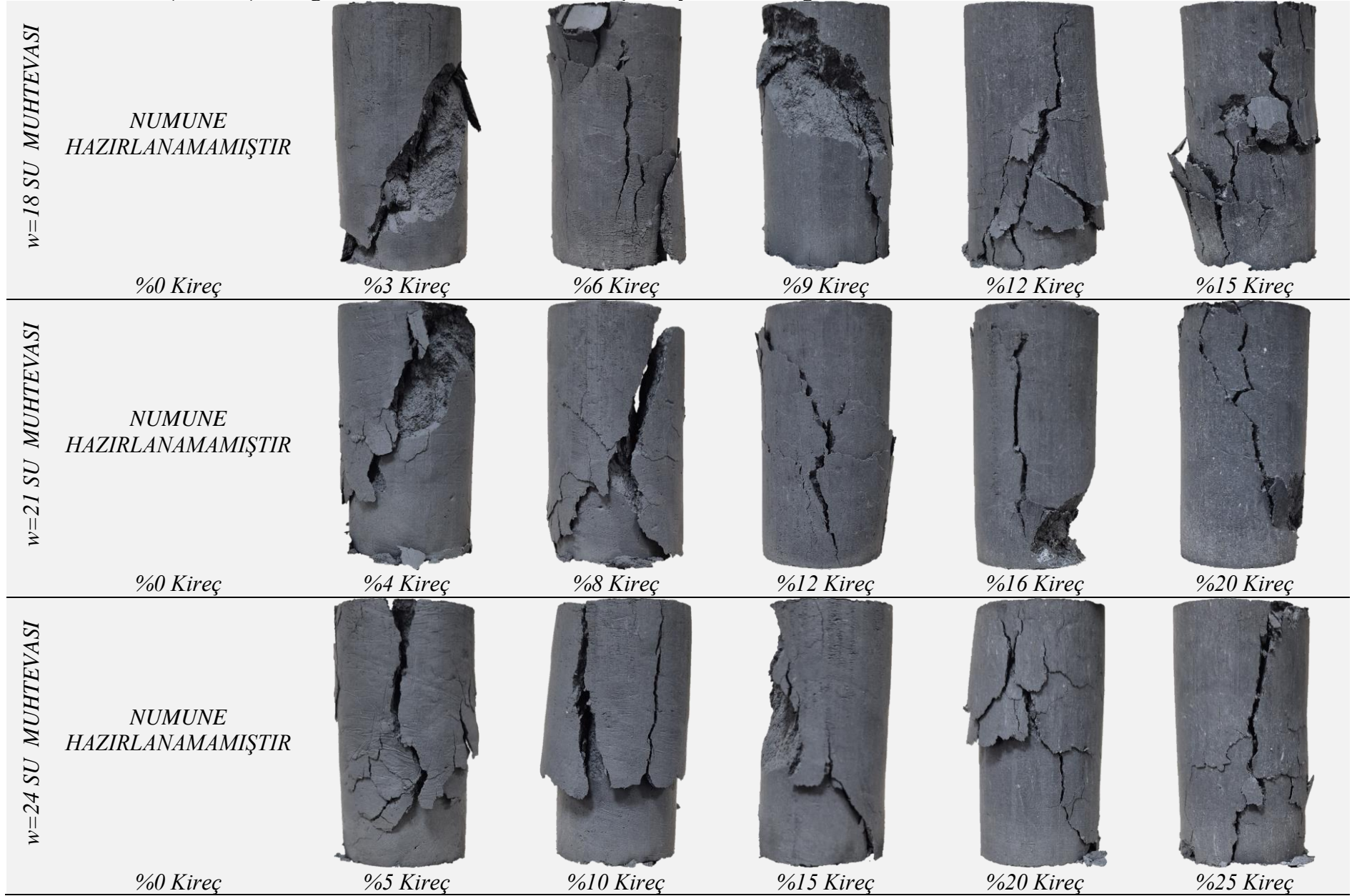
Tablo 4.3(Devamı): 28 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları

<i>w=18 SU MUHTEVASI</i>						
	<i>%0 Kireç</i>	<i>%3 Kireç</i>	<i>%6 Kireç</i>	<i>%9 Kireç</i>	<i>%12 Kireç</i>	<i>%15 Kireç</i>
<i>w=21 SU MUHTEVASI</i>	<i>NUMUNE HAZIRLANAMAMIŞTIR</i>					
	<i>%0 Kireç</i>	<i>%4 Kireç</i>	<i>%8 Kireç</i>	<i>%12 Kireç</i>	<i>%16 Kireç</i>	<i>%20 Kireç</i>
<i>w=24 SU MUHTEVASI</i>	<i>NUMUNE HAZIRLANAMAMIŞTIR</i>					
	<i>%0 Kireç</i>	<i>%5 Kireç</i>	<i>%10 Kireç</i>	<i>%15 Kireç</i>	<i>%20 Kireç</i>	<i>%25 Kireç</i>

Tablo 4.4: 91 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları



Tablo 4.4(Devamı): 91 günlük numunelerin serbest basınç deney sonrası fotoğrafları



5.SONUÇLAR

Laboratuvara getirilen tabii zemine öncelikle yapılan elek analizi deneyleri ile numunenin %88 kısmı 4 No'lu elekten geçtiği, %53,58 kısmı 200 No'lu elekten geçtiği anlaşılmış olup kıvam limiti deneyleri ile zeminin likit limiti 21,0 plastik limiti 14 ve plastisite indisi 7 olduğu tespit edilmiştir. Koyu antrasit renginde olan zemin numunesinin Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre A hattı ile U hattı arasında, CL düşük plastisiteli kil olduğu tespit edilmiştir.

%12 su muhtevasına sahip numuneye kireçsiz, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç eklenerek yapılan deneylerde kireçsiz numunenin sırasıyla 7, 28 ve 91 günlük serbest basınç değerleri 301- 243- 267 kPa olduğu %0 kireçli numunede kür süresinin herhangi bir mukavemet üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. %2 kireç oranı eklenerek yapılan deneylerde serbest basınç değerleri 731 –738- 940 kPa olduğu kireçsiz tabii zemine göre mukavemet değerinin yaklaşık 3 kat arttığı, kür süresine bağlı olarak 7 ve 28 günlük değerlerin birbirine yakın olduğu ancak 91 günlük değer yaklaşık 200 kPa arttığı anlaşılmıştır. %4 kireç oranı eklenerek yapılan deneylerde serbest basınç değerinin 1003- 991 – 1171 kPa olduğu kireçsiz tabii zemine göre mukavemet değerinin yaklaşık 4 kat arttığı gözlemlenmiştir. %6 kireç oranında yapılan deneylerde ise 1104 – 1361- 1456 kPa olduğu kür süresi ile dayanımın belirgin arttığı birim deformasyonun azaldığı gözlemlenmiştir. %8 kireç eklendiğinde 1304- 1365- 1375 kPa değerleri elde edilmiş %6 ya oranla fazla artış olmadığı, kür süresi ile belirgin artış olmadığı gözlemlenmiştir. %10 kireç eklenerek yapılan deneylerde 1174- 1371- 1927 kPa değerleri elde edilmiş 7 ve 28 günlük serbest basınç değerlerinin %6 ve %8 kireç oranında elde edilen değerlere yakın olduğu ancak 91 günlük dayanımın kür süresi ile arttığı anlaşılmıştır. Kireç oranı arttırılarak yapılan deneylerde %6 su muhtevasından sonra 7 ve 28 günlük serbest basınç değerleri artmadığı uygulamalarda yapımı değerlendirildiğinde %12 su muhtevasına göre %4 ve %6 kireç oranlarının uygulanabilirliğinin daha ekonomiklik olacağı belirli kireç oranından sonra mukavemetin belirgin oranda artmadığı anlaşılmıştır.

Farklı su muhtevaları ve farklı kireç oranları eklenerek yapılan deneylerin grafikleri genel olarak incelendiğinde %0 kireç ile hazırlanan numunelerin gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) eğrileri daha yatık olduğu, kireç oranı artması ile gerilme-şekil değiştirme eğrisinin daha dik hale geldiği, birim deformasyonun azaldığı, dayanımın kireç oranı ile arttığı gözlemlenmiştir. Kür süresi grafikleri incelendiğinde kür süresi ile gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) eğrisinin yatık halden daha dik ve sola doğru yöneldiği kür süresi ile dayanımın arttığı ve birim deformasyonun azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablolarda bulunan numune kırım fotoğrafları incelendiğinde kırılma modellerin belirgin şekilde farklı olduğunu ve öncelikle numunelerin kireç eklenmesi ile değişim gösterdiği açıkça gözlemlenmiştir. Kireç eklenmeden hazırlanan numuneler de yumuşak zeminlerde gözlemlenen plastik kırılma davranışı görüldüğü, şişme ve düzensiz yanal genişleme görülmüştür. Kireç eklenerek yapılan deneylerde sert zeminlerde görülen diyagonal kırılma gözlemlenmiştir. Yüksek mukavemet değeri gösteren numunelerin kırılma tipleri incelendiğinde, numunenin üst veya alt ucunda konik bir yarığın kırıldığı gözlemlenmiştir. Su muhtevasının yüksek olduğu numunelerde ise, ağırlıklı olarak kayma hatası şeklinde bir öteleme kırılması gözlemlenmiştir.

Genel olarak tasarımcılara yönelik yorum yapılacak olursa zeminin plastik limit sınırına yakın su muhtevalarında sönmüş kireç ile yapılan kireç stabilizasyonunda %4 veya %6 gibi kireç oranı ile dayanımda artışın 6-8 kat civarında artış olduğu bu uygulamalarının sahada da verimli sonuçlar oluşturacağı öngörülmektedir. Su muhtevasının artması ile likit limit civarına doğru zeminde yapılan kireç katkısı ile dayanımın arttığı ancak istenilen seviyelerde olmadığı yüksek sönmüş kireç oranı ile dayanımın arttığı ancak bunun ekonomik ve uygulanabilirliğinin uygun olmadığından, yüksek su muhtevalarında kireç stabilizasyonunun sönmemiş kireç ile yapılmasının daha uygun olacağı anlaşılmıştır.

KAYNAKÇA

- Amadi, A.A.& Okeiyi, A. (2017). *Use Of Quick And Hydrated Lime In Stabilization Of Lateritic Soil: Comparative Analysis Of Laboratory Data*. International Journal of Geo-Engineering, 8, (3).
- Atabey, V. (t.y.). *Dinamik kompaksiyon metodu*. İnternet. Erişim Adresi: (<https://volkanatabey.com.tr/insaat-projelerinde-kullanilan-kompaksiyon-yontemleri/>) (Erişim Tarihi: 18.04.2026).
- Ataş & Aral / *İnce Daneli Zeminlerde Jet Grout ve Fore Kazık Yöntemleri ile Zemin İyileştirilmesi ve Yapılabilirliğinin Optimizasyonu* Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Cilt 10, Sayı 2
- Atay, S. (t.y.). *Zayıf zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi*. Youtube. Erişim Adresi: (https://www.youtube.com/watch?v=1Qkp59gvi_o) (Erişim Tarihi: 16.11.2025).
- Bell, F.G. (1996) Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. Engineering Geology, 42, 223-237
- Bozbey, İ., Keleşoğlu, M. K., Çomez, Ş., Mert, A., Öztürk, T., & Öcal, K. (2017). *Kireç İle Stabilize Edilen Zeminlerin Karayolu Üstyapısında Kullanımlarında Zeminin Arazideki Ufalama Seviyesinin Etkisinin Araştırılması*. 7. Asfalt Sempozyumu ve Sergisi (ss.1). Ankara, Türkiye.
- Bozkurt, E. (2020). *Arazide Yüksek Su Muhtevası İçeren Bir Kilin Kireç İle Stabilizasyonu*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Broderick, G.P., & Daniel, D. P. (1990), *Stabilizing Compacted Clay Against Chemical Attack*. Journal of Geotechnical Engineering Division, 116(10), s. 1549-1567.
- Can, B. (2017). *Sülfat İçeriği ve Sıkıştırma Su Muhtevasının Killi Zeminlerin Kireç Stabilizasyonuna Etkisi*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Durmaz, M. (2020). *Killi Zeminlerin Kireç ile Stabilizasyonunun Deneysel Çalışması ve Sonuçların İstatistiksel Değerlendirilmesi*. European Journal of Science and Technology. 973-980. 10.31590/ejosat.709160.

- Erol, A.O., Çekinmez Bayram, Z., & Kuruoğlu Ö. (2016). *Vibro – Zemin İyileştirme Yöntemleri Vibro Sıkıştırma Ve Taş Kolonlar*, Ankara.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., & Yıldırım, E. (2019). Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 34 (4). 171-180.
- Holtz, R.D., & Kovacs, W.D. (2002). *Kompaksiyon. Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. s. 95-145. (Çev. K. Kayabalı). Gazi Kitapevi Yayınları.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Ankara.
- Kavak, A., & Akyarlı, A. (2007). A field application for lime stabilization. *Environmental Geology*. 51. s. 987-997.
- Kavak, A., & Baykal, A. (2012). Long-term behaviour of lime-stabilized kaolinite clay. *Environmental Earth Sciences*. 66(7), 1943-1955.
- Kavak, A., Güngör, A.G., Avşar, C., Yöner, G., Tokgöz, M., & Akyarlı, A. (2009). *Kil Oranı Yüksek Bir Dolgu Malzemesinin Kireç İle Stabilizasyonu*. 14. Ulusal Kil Sempozyumu. Trabzon.
- McCarthy, D.F. (2010). *Zemin Mekaniğinin Esasları ve Temeller; Temel Geoteknik*. (Çev.: E. Basmacı). OYTEV.
- Orhan, M., Özer, M., & Işık, N.S. (2018). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*. Gazi Kitapevi Yayınları.
- Özaydın, K. (2011). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi.
- Raju, V.R., & Sondermann, W. 2005. Application of the vacuum preloading method in land reclamation and soil improvement projects. Chapter 21, *Ground Improvement - Case Histories*. B. Indraratna & J. Chu (Eds.), Elsevier, 601-638.
- Rogers, C.D., & Glendinning, S. (1993). *Modification Of Clay Soils Using Lime*. Proceeding of the Seminar held at Loughborough University on Lime Stabilization, 99-114.
- Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2020). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (23), 481-496.

Şengül, E. (2010). *Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu Ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Şengül, T. (2023). *Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Uygulamaları ve Kullanılan Malzemeler*. İçinde Gürel, E., Seyrek, E., Umu, S., Topçu, S., Tosun, H., Tuncel, O., Özçelik, M., Güler, E., Afacan, K., Şengül, T., Vitosoglu, Y., & Tün, M. (Ed.) *Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar*. s. 121-166. 10.58830/ozgur.pub391.

Uzuner, B.A. (2014). *Temel Zemin Mekaniği*. Derya Kitapevi.

Welsh, J. P., & Burke, G. K. (2000). Advances in grouting technology. In ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Taha Coşkun TATLI
Doğum Yeri ve Tarihi:	Erzurum/ 15.07.1995
EĞİTİM DURUMU	
Lisans Öğrenimi:	Gazi Üniversitesi/ Teknoloji Fakültesi/ İnşaat Mühendisliği Bölümü
Y. Lisans Öğrenimi:	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ İnşaat Mühendisliği Bölümü
İLETİŞİM BİLGİLERİ	
e-posta:	tahacoskuntat@gmail.com
Tarih:	02.02.2026