



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YUMUŞAK KİLLİ
ZEMİNLERDE ZEOLİT VE POLİPROPİLEN ELYAF İLAVESİNİN
ETKİSİ

JAN AGHA SHAGIWAL

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMEDİN TOTİÇ

BARTIN-2023



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YUMUŞAK KİLLİ ZEMİNLERDE
ZEOLİT VE POLİPROPİLEN ELYAF İLAVESİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jan Agha SHAGIWAL

BARTIN-2023

KABUL VE ONAY

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ danışmanlığında hazırlamış olduğum “ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YUMUŞAK KİLLİ ZEMİNLERDE ZEOLİT VE POLİPROPİLEN ELYAF İLAVESİNİN ETKİSİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

06.07.2023

Jan Agha SHAGIWAL

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm çalışmalarda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ'e, deneysel çalışmaların gerçekleşmesi için laboratuvar olanakları sağlayan İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, çalışmada kullanılan polipropilen elyafın temininde yardımlarını esirgemeyen Fibrobeton Yapı Elemanları Sanayi İnşaat ve Ticaret A.S. çalışanlarına, çalışmasının hazırlanması sürecinde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ağabeyim Dr. Tamim SHAGIWAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Jan Agha SHAGIWAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLMİŞ YUMUŞAK KİLLİ ZEMİNLERDE ZEOLİT VE POLİPROPİLEN ELYAF İLAVESİNİN ETKİSİ

Jan Agha SHAGIWAL

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ

Bartın-2023, sayfa: 72

Yumuşak killi zeminler genellikle düşük dayanıma ve yüksek oturma potansiyeline sahiptir. Bu tür zeminlerin buldukları konumlar itibariyle değerlendirilip, mevcut bölge koşulları ile stabilizasyon yapılması gerekliliği ekonomik açıdan öne çıkmaktadır. Çimento zemin özelliklerini geliştirmek için son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çimentonun hamurunun gevrek yapısı, yüksek üretim maliyeti ve üretim sırasında sera gazlarının salınımı gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle çimentonun tamamen veya en azından kısmen yerini alabilecek çevre dostu, uygun maliyetli ve sürdürülebilir yeni malzemeler bulmak günümüzde büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Bartın kenti yerleşim alanında yer alan düşük dayanım ve düşük taşıma kapasitesine sahip yumuşak killi zeminlerin güçlendirilmesi için yüksek performanslı, maliyeti geleneksel harca göre düşük, çevre dostu ve daha esnek bağlayıcı bir harç geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu hedefe ulaşmak için Portland çimentosu ile birlikte doğal zeolit ve polipropilen elyaf kullanılmıştır. Bu hedefe doğrultusunda doğal zemine ağırlıkça %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Portland çimentosu eklenmiş ve çimento ağırlığının %0, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında zeolit ile yer değiştirilmiştir. Zemin-çimento-zeolit karışımlarına ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında polipropilen elyaf eklenerek yapay zemin karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların Standart proktor deneyi ile maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Elde edilen karışımlar, belirlenen maksimum kuru birim hacim

ağırlıklarda sıkıştırılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numuneleri 3, 7 ve 28 gün süre ile $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında nemli ortamda kür edildikten sonra üzerinde serbest basınç ve dolaylı çekme deneyleri uygulanmıştır. Aynı koşullarda ve oranlarda Portland çimentosu kullanılarak referans numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen deney sonuçları referans numunelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılarak katkı oranı ve kür süresine bağlı olarak dayanım gelişmeleri incelenmiş ve stabilize edilmiş zemin matrisinde optimal katkı oranları belirlenmiştir. Ayrıca üretilen numunelerden seçilen serilerde SEM analizi yapılarak mikro yapıdaki değişim ve mekanik davranışı ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak %20 zeolit ve %0.25 polipropilen elyaf içeren numunelerinin çimentolu karışımlara kıyasla az miktarda deformasyona karşı direnç ve mukavemetin en yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, Killi zemin, Çimento, Zeolit, Polipropilen elyaf, Serbest basınç dayanımı, Dolaylı çekme dayanımı

Bilim Alanı Kodu: 91105

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF ZEOLITE AND POLYPROPYLENE FIBER ADDITION ON CEMENT STABILIZED SOFT CLAYEY SOILS

Jan Agha SHAGIWAL

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ermedin TOTIÇ

Bartın-2023, pp: 72

Soft clayey soils generally have low bearing capacity and high settlement potential. Evaluating these types of soils in terms of their location and the stabilization of the existing conditions is economically important. Cement has been widely used in recent years to improve soil properties. However, cement has disadvantages such as its brittle structure, high production costs, and greenhouse gas emissions during production. Therefore, finding environmentally friendly, cost-effective, and sustainable new materials that can completely or at least partially replace cement is of great importance today. In this study, a high-performance, cost-effective, environmentally friendly, and more flexible binder was developed to strengthen soft clayey soils with low strength and low bearing capacity in the residential area of Bartın city. To achieve this goal, natural zeolite and polypropylene fibers were used in combination with Portland cement. In line with this objective, Portland cement was added to the natural soil at weight percentages of 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10%, and the cement weight was replaced with zeolite at percentages of 0%, 20%, 40%, 60% and 80%. Artificial soil mixtures were prepared by adding polypropylene fibers at weight percentages of 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1% to the soil-cement-zeolite mixtures. The maximum dry unit weights and optimum water contents of the prepared mixtures were determined using the Standard Proctor test. The obtained mixtures were compacted at the determined maximum dry unit weights to prepare the test specimens. The specimens were cured in a

moist environment at $23\pm 1^\circ\text{C}$ for 3, 7, and 28 days, after which unconfined compression and indirect tensile tests were performed. Reference specimens were prepared using Portland cement under the same conditions and proportions. The obtained test results were compared with the results of the reference specimens to examine the strength improvements depending on the additive ratio and curing period, and optimal additive ratios were determined in the stabilized soil matrix. Additionally, selected series of specimens were subjected to SEM analysis to correlate microstructural changes with mechanical behavior. As a result, it was determined that the specimens containing 20% zeolite and 0.25% polypropylene fibers exhibited the highest resistance and strength against slight deformation compared to the cementitious mixtures.

Keywords: Soil improvement, Clay soil, Cement, Zeolite, Polypropylene fiber, Unconfined compressive strength, Indirect tensile strength

Scientific Field Code: 91105

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
EKLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. ZEMİN İYİLEŞTİRME.....	9
3.1 Zemin İyileştirmenin Amacı.....	10
3.2 Zemin iyileştirme Yönteminin Seçimi	11
3.3 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	12
3.3.1 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	12
3.3.1.1 Drenaj Yöntemi.....	12
3.3.1.2 Yüzeysel Kompaksiyon.....	16
3.3.1.3 Kireç ile Stabilizasyon	17
3.3.1.4 Çimento ile Stabilizasyon	18
3.3.1.5 Uçucu Kül ile Stabilizasyon	19
3.3.1.6 Bitüm ile Stabilizasyon	20
3.3.2 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	20
3.3.2.1 Önyükleme.....	20
3.3.2.2 Kum Drenleri	21

3.3.2.3 Prefabrik Drenler.....	22
3.3.2.4 Dinamik Kompaksiyon.....	23
3.3.2.5 Vibro Kompaksiyon.....	24
3.3.2.6 Kompaksiyon Kazığı.....	25
3.3.2.7 Patlatma	25
3.3.2.8 Taş Kolon.....	26
3.3.2.9 Jet Grout Yöntemi	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
4.1 Malzemeler.....	28
4.1.1 Kil	28
4.1.2 Çimento	28
4.1.3 Zeolit.....	30
4.1.4 Polipropilen Elyaf	31
4.1.5 Karışım Suyu	32
4.2 Yöntem	32
4.2.1 Karışımların Hazırlanması	32
4.2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Edilmesi.....	35
4.2.3 Piknometre Deneyi.....	35
4.2.4 Standart Proktor Deneyi	37
4.2.5 Serbest Basınç Deneyi.....	37
4.2.6 Dolaylı Çekme Deneyi.....	38
4.2.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	39
5. BULGULAR.....	41
5.1 Piknometre Deney Sonuçları.....	41
5.2 Standart Proktor Deney Sonuçları.....	41
5.3 Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	43
5.4 Dolaylı Çekme Deney Sonuçları	52

5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları	56
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	58
KAYNAKÇA.....	61
EKLER	68
ÖZGEÇMİŞ.....	72

ŞEKİLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
3.1: Kuyu noktası sisteminin kurulumu (Raj, 2008)	14
3.2: Derin kuyu drenaj sistemi (Raj, 2008)	15
3.3: Derin kuyu drenaj tamamlanan kurulumun detayları (Raj, 2008)	15
3.4: Vakumlu susuzlaştırma yöntemi (Raj, 2008)	16
3.5: Dinamik kompaksiyon şeması (Nicholson, 2015)	23
3.6: Vibro kompaksiyon uygulaması (Brown, 1977)	24
3.7: Jet grout sistemi şematik gösterimi (Kovačević, 2006)	27
4.1: Çalışmada kullanılan zemine ait a) alındığı konumu b) genel görünüm ve c) SEM görünümü	29
4.2: Deneysel çalışmada kullanılan zeolite ait a) genel görünüm ve b) SEM görünümü ...	30
4.3: Düşük plastisiteli kil ve doğal zeolitin tane boyutu dağılım eğrisi	30
4.4: Çalışmada kullanılan polipropilen elyaf genel görünümü	31
4.5: Çalışmada karışım hazırlanması a) zemin numunesinin kurtulması, b) katkıların eklenmesi ve karıştırılması, c) hazırlanmış karışım görünümü	33
4.6: a) Çalışmada kullanılan deney kalıpları, b) numune sıkıştırılması, c) deney numuneleri ve d) kür ortamı	36
4.7: Piknometre deney aşamaları	36
4.8: Standart proktor deney aşamaları	37
4.9: Serbest basınç dayanım deneyi uygulanması	38
4.10: Dolaylı çekme dayanımı deneyi uygulanması	39
5.1: Karışım numunelerin katkı oranlarına göre tane birim hacim ağırlığı değişimi	41
5.2: Deney karışımların kompaksiyon eğrileri	43
5.3: a) Çimento içeren numunelerinin kür süresi ile serbest basınç dayanımının değişimi, b) 28 günlük yenilme mekanizmaları	44
5.4: Polipropilen elyaf içeriğine bağlı Portland çimentosu katkılı karışımların serbest basınç dayanımı a) %2.5-%5 ve b) %7.5-%10 (kesik çizgiler %2.5 ve %7.5 çimentolu karışımları göstermekte)	45
5.5: 28 günlük polipropilen elyaf ve Portland çimentosu katkılı karışımlarına ait eksenel deformasyon basınç dayanımı ilişkisi	46
5.6: Zeolit ve çimento içerikleri ile serbest basınç dayanımlarının kür süresine göre değişimi	47

5.7: 28 günlük çimento ve zeolit katkıli karışımlarına ait aksenal deformasyon basınç dayanımı ilişkisi	48
5.8: Polipropilen elyaf içeriğine bağlı zeolit ve Portland çimentosu katkıli karışımları ve kür süresinin serbest basınç dayanımı değerlerine etkisi.....	49
5.9: 28 günlük %10 çimento ve zeolit numunelerine ait polipropilen elyaf içeriğine bağlı gerilme-gerinim eğrileri	50
5.10: Çalışmada kullanılan katkı maddelere göre elastisite modülü (E_{50}) değişimi	51
5.11: Çalışmada kullanılan katkı maddelerinin elastisite modülü (E_{50}) elyaf yüzdesine göre değişimi	52
5.12: Stabilize edilmiş numunelerin dolaylı çekme dayanımı a) kil ve polipropilen elyaf, b) kil ve Portland çimentosu	53
5.13: Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlere polipropilen elyaf eklenmesinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi	54
5.14: Çimento ve zeolitin Bartın killi zeminler üzerindeki etkisi	55
5.15: Çimento ile stabilize edilmiş numunelerin zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin dolaylı çekme dayanımına etkisi	56
5.16: SEM görüntüsü a) doğal zemin, b) %4.5 çimento ve %3 zeolit karışımı	57
5.17: Çimento-zeolit ve polipropilen elyaf karışım numunelerine ait SEM görüntüleri.....	57

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
4.1: Deneysel çalışmada kullanılan killi zeminin geoteknik özellikleri.....	29
4.2: Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri	31
4.3: Deneysel çalışmada kullanılan polipropilen elyafın özellikleri	32
4.4: Deneyde kullanılan karışımların deneysel programı.....	33

EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No
EK.1: Serbest basınç dayanım deney sonuçları	68
EK.2: Dolaylı çekme dayanım deney sonuçları.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: santigrat derece
cm	: santimetre
cm ³	: santimetreküp
dk	: dakika
E ₅₀	: elastisite modülü
g/cm ³	: gram/santimetreküp
g	: gram
kg	: kilogram
kN/m ²	: kilonewton/metrekare
kPa	: kilo paskal
m	: metre
mm	: milimetre
MPa	: megapaskal
N	: newton
q _u	: serbest basınç dayanımı
γ _d	: kuru birim hacim ağırlığı
γ _{dmax}	: maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ _n	: doğal birim hacim ağırlığı
γ _s	: tane birim hacim ağırlığı
µm	: mikrometre
σ _t	: dolaylı çekme dayanımı
w	: su muhtevası
w _{op}	: optimum su muhtevası
ε	: birim şekil değiştirme

KISALTMALAR

A	: Numune Kesit Alanı
CBR	: California Taşıma Oranı
CL	: Plastisiteli Kil
D	: Numunenin Çapı

K	: Kil
L	: Numunenin Boyu
LL	: Likit Limit
P	: Numunenin Göçme Yüğü
PC	: Portland Çimento
PE	: Polipropilen Elyaf
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflanma Sistemi
Z	: Zeolit

1. GİRİŞ

İnşaat projeleri, tüm kısıtlamaları dengelerken proje hedeflerine ulaşmada birden fazla zorluklarla karşı karşıyadır. Bu nedenle maliyet, zaman, performans ve kalite ile ilgili proje hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olacak tüm olası yaklaşımları öngörmek çok önemlidir. Bir mühendislik projesinin inşasından önce mevcut proje alanı veya zemini, binanın veya yapıların yapısal yükünü taşıyabilecek durumda olup olmadığını kontrol edilmelidir. Örneğin yumuşak killi zeminlerin oturma potansiyelleri yüksek olup taşıma gücü oldukça zayıftır. Uygulama sahalarında bu tür zeminin varlığı yapılarda hasarlara neden olur. Bu sorunun çözümü için kullanılan standart yaklaşım, yumuşak zemin tabakasını yeterli derinliğe kadar kazılarak kaldırılması, yerine optimum granülometride kırma taş, çakıl ve kum kombinasyonu serilerek sıkıştırılmasıdır. Mukavemeti düşük, yumuşak killi zeminin; yüksek mukavemetli iri taneli zeminle yer değiştirmesi işlemi çoğu zaman ekonomik ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Özellikle yol yapıları gibi geniş yüzey alanı ve büyük hacimli kazılar gerektiren yapılarda kontrollü dolgu uygulamalarının yüksek maliyetleri, geoteknik mühendisliğini alternatif yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir. Arazide bulunan, zayıf zeminlere belirli oranlarda puzolanik malzeme katılarak mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi son yıllarda sıklıkla uygulanan, maliyet ve yapım sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir.

Çimento uygun performanslarından dolayı zemin özelliklerini geliştirmek için son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kilin çimento ile karıştırılmasının ilk aşamasında, kil matrislerinin içindeki doğal bağlar yok olurken, çimento etkisiyle yeni bağlar oluşturulmaktadır. Birçok çalışma, su içeriği, çimento oranı ve kür süresi gibi çeşitli düzenleyici faktörleri içeren çimentolu kilin davranışına odaklanmıştır (Horpibulsuk vd., 2003; Horpibulsuk vd., 2004; Kılıc, 2008; Horpibulsuk vd., 2011; Boroumandzadeh ve Pakbaz, 2012; Kök ve Yılmaz, 2012; Pakbaz ve Alipour, 2012). Literatürden, çimento ile iyileştirilmiş yumuşak killerde, çimento oranı ve kür süresi artmasıyla kesme ve basınç dayanımı arttığını görülmektedir.

Zemin iyileştirilme işlemlerinde çimentonun yaygın olarak kullanılmasına rağmen bazı durumlarda bu malzemenin kullanımı sorun yaratmaktadır. Çimentolu zeminler daha yüksek çimento içeriklerinde, daha düşük çevre gerilmeleri ve daha gevrek gerilme-şekil değiştirme

davranışı sergiler (Schnaid ve Prietto, 2001; Basha vd., 2005). Çimentolu zeminlerin gevrek davranışlarından dolayı, özellikle sığ derinliklerde yapılarda ani göçmelere neden olabildikleri için bazı durumlarda kullanılmasına izin verilmeyebilir. Bununla birlikte çevresel bir bakış açısıyla çimento endüstrisinin tüm dünyada salınan karbondioksitin (CO₂) yaklaşık %7'sinden sorumlu olduğu istatistiksel olarak tahmin edilmektedir (Mehta, 1999; Damtoft vd., 2018). Sonuç olarak çimentolu zeminlerin kırılma yapısını ve çevre zararları önlemek için çimentonun bir kısmının daha çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir puzolanik malzemelerle değiştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Zemin iyileştirilmesinde bugüne kadar birçok farklı alternatif malzeme üzerinde çalışılmış ve uygulamalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları doğal yollarla elde edilirken, bazıları sanayi ürünü veya sanayi artığı malzemelerdir.

Yapılan bu çalışma çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli killi zemine zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin etkisini araştırılmayı amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda doğal zemine %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 farklı oranlarda Portland çimentosu eklenerek çimento ağırlığının %0, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında zeolit ile yer değiştirilmiştir. Elde edilen zemin, çimento ve zeolit karışımlarına ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında polipropilen elyafı ilave edilerek yapay zemin karışımları oluşturulmuştur. Elde edilen karışımlardan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak deney numuneleri hazırlanmış ve oda sıcaklığında nemli ortamda farklı sürelerde kür edilmiştir. Kürlenmiş karışım numuneleri üzerinde serbest basınç ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak mekanik davranışlarını incelenmiştir. Ayrıca üretilen numunelerden seçilen serilerde SEM analizi yapılarak mikro yapıdaki değişim ve mekanik davranışı ilişkilendirilmiştir.

Tezin birinci bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı yer almaktadır. İkinci bölümde konu hakkında literatür özeti. Üçüncü bölümde zemin iyileştirme amaç ve zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışmada materyal ve yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde elde edilen deney bulguları sunulmuştur. Tezin son bölümünde ise elde edilen sonuçları özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çevreyi korumanın ve çimento üretim sürecinden kaynaklanan kirliliğin azaltılmasının önemi, çimento yerine kullanılabilir alternatif arayışlarına yol açmıştır. Bu optimizasyon, doğal kaynakların kullanımını doğrudan en aza indirir, enerji tüketimini azaltır, çevreyi korur ve endüstriyel atıkların yansıra çevre dostu malzemeleri yeniden kullanılır. Bu nedenle, çimento üretimi için daha az enerji tüketilen bir karışımın optimizasyonu önemli bir hedef haline gelmiştir. Kısmen çimento ikamesi olarak puzolanik maddelerin, özellikle doğal puzolanların kullanılması, çimento tüketimini azaltmak için uygun bir seçenek olarak kabul edilebilir (Poon vd., 1999; Gholhaki vd., 2018; Rahgozar vd., 2018; Saberian vd., 2018; Mola Abasi vd., 2019).

Puzolanlar silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. Puzolanlar çimento kullanımını azaltmalarını, yüksek dayanım sağlamaları, uygulanabilirliği artırmaları, sülfat ve asit ataklarına karşı direnci geliştirmeleri ve ekonomik kazanç sağlamaları nedeniyle çimento ve betonda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bagherian, 2003).

Zeolitin fizikokimyasal özellikleri, çevre dostu olması ve uygun maliyet etkinliği nedeniyle, bu yeni doğal volkanik malzeme birçok geoteknik çalışmalarda kullanılmıştır (Kaya ve Durukan, 2004; Hong vd., 2012; Ören vd., 2011; Turkoz ve Vural, 2013; Ling vd., 2013; Ling vd., 2015; Shang, 2015; Savaş, 2016).

Shi, (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada zemin özelliklerini iyileştirmek ve çevresel etkiyi azaltmak için Portland çimentosuna katkı maddesi olarak zeolit kullanılmıştır. Killi silt ve çakıllı kumun stabilizasyonu için zeolit ile çimento 1:9 oranı ile bir karıştırma tekniği kullanarak zeolit ve Portland çimento karışımı killi silt ve çakıllı kuma %2.5, %5 ve %10 olmak üzere üç farklı kuru ağırlık yüzdesinde eklenerek hazırlanan deney numunelerine üç kürlenme döneminde (7, 28 ve 90 gün) serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak 90 gün kürlenme süresinde %10 zeolit-Portland çimento karışımlarının en yüksek serbest basınç dayanımı 1.28 MPa olarak elde edildiğini göstermiştir.

Turkoz ve Vural, (2013) yaptıkları çalışmada çimento ve doğal zeolit katıklarının killi zeminlerin dağılıbilirlik özelliklerine ve şişme potansiyeline etkisini incelenmiştir.

Çalışmada %3 sabit çimentoya %1, %3, %6, %10, %15 ve %20 farklı yüzdelerde doğal zeolit dört farklı killi zemin numunesiyle karıştırılmıştır. Deney numuneleri 7 ve 28 gün kürlendikten sonra numuneler üzerine farklı deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak şişme potansiyeli ve dağılıbilirlik açısından karşılaştırıldığında, %3 çimento ve %6-%10 zeolit katkı seviyelerinde numunelerin hem dağılma hem de şişme özelliklerinde iyileşme görülmüştür.

Mola Abasi vd., (2016) tarafından, yaptıkları çalışmada zeolit ve çimento katkılarının kumlu zeminin mekanik davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada doğal zemine ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında Portland çimentosu eklenerek ve çimentonun ağırlığının %0, %10, %30, %50, %70 ve %90 oranlarında zeolit ile yer değiştirilerek deney numuneleri 24°C’de ve bağıl nemi %90’ın üzerinde olan nemli bir odada 28 gün kür edilmiştir. 28 gün kürlenme süresinden sonra serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak zeolit ile çimento incelenen tüm aralıklar için serbest basınç dayanımının önce artmasına sonra azalmasına neden olmuşlar ve tüm zemin-çimento-zeolit karışımları için polinom ilişkileri gözlemlenmişlerdir. Ayrıca çimentonun zeolit ile %30 oranında yer değiştirilmesinde maksimum serbest basınç dayanımının elde edildiğini göstermişlerdir.

Kordnaej vd., (2019) tarafından laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmada zeolitli çimento ile enjeksiyon yapılmış gevşek kumlu zeminlerin serbest basınç dayanımı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm kumlar (D_{11} , D_1 ve D_2) ve suyun çimentolu malzemeler ile 2, 3, 5 ve 7 oranlarında ve çimento % 0, %10, %20, %30, %40, %50, %70 ve %90 oranlarında zeolit ile değiştirilerek hazırlayan deney numuneleri plastik bir tabakaya sarılarak, nem içeriklerinde önemli değişimleri önlemek için çift katlı plastik torbalara yerleştirilerek yaklaşık 23°C’de 90 gün kürlenmiştir. 90 gün kürlenme süresinden sonra serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak zeolit %30’a kadar çimento ile yer değiştirilmesi serbest basınç dayanımı artmıştır. Çimentoda zeolit %30 üzerine artırılması ile enjeksiyonlu kum numunelerinin serbest basınç dayanımında bir azalmaya yol açmıştır.

Goodarzian vd., (2020) yaptıkları çalışmada nano zeolit ince taneli bir zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmışlardır. Çalışmada killi zemine üç farklı kuru ağırlık yüzdesinde %3, %5 ve %7 kolloidal süspansiyon olarak nano zeolit eklenerek hazırlanan deney numuneler 1, 7, ve 28 gün üç farklı kürlenme süresinden sonra Atterberg

limitleri ve serbest basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuşlar. Çalışma sonucu nano zeolit oranı artmasıyla likit limit ve plastik limit artarken plastik indisinde azalma gözlenmiş. Kür süresi artmasıyla artan nano zeolit yüzdesi ile serbest basınç dayanımı da artış eğilimi göstermişti.

Norouznejad vd., (2021) yaptıkları çalışmada zeolitin çimentolu kumun sıkıştırma özellikleri ve California Taşıma Oranı (CBR) üzerindeki etkisini araştırmak amaçla ilk olarak kum, çimento (kum kuru ağırlığına göre %2, %4, %6 ve %8) ve zeolit (çimento içeriğinin %0, %30, %60 ve %90'ı ikame malzemeler olarak) karıştırılmışlardır. Hazırladıkları numuneler 28 gün kürlendikten sonra Standart proktor ve CBR testlerine tabi tutulmuş. Çalışma sonucunda araştırmacılar, zeolit kullanımının çimentolu kumun optimum su içeriğini artırırken maksimum kuru birim hacim ağırlığını azalttığını göstermişleridir. Ayrıca, çimento içeriğinin %30'a kadar zeolit içermesi, puzolanik ve kimyasal reaksiyonlar nedeniyle en yüksek CBR değerlerine katkıda bulunduğunu vurgulamışlardır.

Chenarboni vd., (2021) yaptıkları çalışmada zeolit ile çimento ikamesinin çimento ile stabilize edilmiş şişen zeminlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlanmıştır. Çalışmada zemine ağırlıkça %6, %8, %10 ve %12 oranlarında çimento eklenerek ve çimento ağırlığının %0, %10, %30, %50, %70 ve %90 oranlarında zeolit ile yer değiştirerek hazırlayan deney numuneleri 28 gün kürlendikten sonra farklı deneylere tabi tutulmuştur. Sonuç olarak çimentonun %30'a kadar zeolit ile değiştirilmesinin serbest basınç dayanımı, göçme gerilmesi, tokluk ve E_{50} gibi özelliklerinin iyileştirildiğini ortaya çıkmıştır.

Mola Abasi vd., (2022) yaptıkları çalışmada düşük plastisiteli kile çimento ve zeolit ilavesinin pH, kompaksiyon özellikleri, dayanıklılık ve işlenmiş zemin ıslanma-kuruma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada zemine ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında çimento ve çimento ağırlığının %0, %15, %30, %45 ve %60 oranlarında zeolit eklenmişler. Hidrasyon ve puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak için 56 günlük kür süresi kabul edilmiştir. Ayrıca dayanıklılığa dayalı parametrelerin değerlendirilmesi için 8'e kadar ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmıştır. Sonuçları elde etmek için hazırlanan deney numunelerine mekanik, fizikokimyasal ve mikroyapı testleri yapılmıştır. Sonuç olarak %15 zeolit, kullanımının stabilizatör içeriğini artırarak çimentolu numunelere göre daha yüksek bir dayanım sağladığını göstermiştir. Ayrıca ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulan numunelerin serbest basınç dayanım değerleri

düşmüş ve bu azalma tüm durumlar için birinci çevrimde daha belirgin olmuştur. 8 döngü ıslanma ve kurumaya maruz kaldıktan sonra üst ve alt sınırların gerilme-gerinim davranışının incelenmesi, mukavemetin ve kırılma gerilmesinin azaldığı göstermiştir. Ayrıca zeolitin %0'den %60'a kadar kırılma gerilmesi artarken, stabilizatör içeriğinin %2'den %8'e çıkarılması göçme gerilmesini azaltıp mukavemeti arttırmıştır.

Sonuç olarak, zeolit ilavesinin çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerin mukavemet özelliklerini artırdığı ve rötre özelliklerini azalttığı görülmektedir. Bu nedenle, zeolit ilavesi, bu tür zeminlerin stabilizasyonu için kullanılabilir bir seçenek olabileceğini görülmektedir.

Çimentolu zeminlerin yüksek dayanımda sünek davranışını artırmak amacıyla doğal lifler (keten, sisal, kenevir, pamuk, hindistancevizi, palmiye, jüt lifi) (Girish, 2000; Ramesh vd., 2010; Hejazi vd., 2012; Singh, 2015), sentetik lifler (polyester elyafı, polipropilen elyafı, karbon, cam elyafı, polivinil klorür elyafı) (Wu ve Li, 1999; Kaniraj ve Havanagi, 2001; Li, 2002; Kumar ve Walia, 2007; Ali ve Raj, 2020; Bağrıaçık vd., 2021) ve atıklardan elde edilen lifler (lastik, plastik, kauçuk) (Chauhan ve Mittal, 2008; Muntohar, 2009; Tang vd., 2016; Yadav ve Tiwari, 2017; Abbaspour ve Aflaki, 2019) kullanılmıştır.

Polipropilen elyafların zemin takviyesi için kullanımı birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır (Chen vd., 2015; Anggraini vd., 2015; Kumar ve Gupta, 2016; Festugato vd., 2018; Wei vd., 2018; Boz ve Sezer, 2018; Roshan vd., 2020).

Kaolin zeminlere elyafın eklenmesinin zemin kayma mukavemetine olan etkilerini araştıran Öztürk (2007), doğal zemine polipropilen elyafın eklenmesi kayma açısı, kohezyon, basınç dayanımı, CBR değerlerini artırdığını, büzülme oranını ise düşürdüğünü rapor etmiştir. Başka bir araştırmada ise elyaf ilavesinin serbest basınç dayanımda düşme eğilimine neden olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarda, en önemli artış %0.5 ile %1 polipropilen elyaf eklenmesiyle gözlemlenmiştir (Sevencan, 2009).

Tang vd., (2007) yaptıkları çalışmada kısa polipropilen elyaf takviyeli ve çimento ile stabilize edilmiş killi zeminin mukavemeti ve mekanik davranışını araştırmıştır. Test sonuçları, çimentosuz ve çimentolu zeminlerde kısa polipropilen elyafın rijitliği ve yenilme

sonrası dayanım kaybını azalttığı ve çimentolu zeminin kırılma dayanımını değiştirdiği görülmüştür.

Kalantari vd., (2010) yaptıkları çalışmada çimento ve polipropilen elyaflarla işlenmiş turba zemin üzerindeki deneysel çalışmalarında, çimento ve polipropilen elyafların, havada kürlenme tekniğini benimseyerek yumuşak turba zeminin mekanik dayanıklılığını geliştirmek için kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Hamidi ve Hooresfand, (2013) yaptıkları çalışmada geleneksel üç eksenli basınç deneylerini kullanarak çimento-elyaf takviyeli kumun geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada kum malzemesine %3 oranında sabit çimento eklenmiş ve kum-çimento karışımına %0, %0.5 ve %1 oranlarında 12mm uzunluğunda elyaf eklenerek 7 gün süreyle kürlenmiştir. Elyafın eklenmesiyle çimentolu zeminin pik ve rezidüel kayma dayanımlarını arttırmış ve kırılma davranışını daha sünek hale getirmiştir.

Gupta vd., (2019) yaptıkları çalışmada polipropilen elyaf çimento ile birlikte düşük yüzdelerle (%0.5 ile %1) oranlarında kullanımının çimentonun etkisine pozitif yönde katkısı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla zemin iyileştirmesinde çimento ile polipropilen elyaf uyumunun iyi olduğunu ve birlikte kullanılabileceği söylenebilir.

Akbari vd., (2021) yaptıkları çalışmada kireçle zemin stabilizasyon yöntemini geliştirmek ve bu tekniğin etkinliğini artırmak için kirecin bir kısmı yerine nano-zeolit ve daha sonra stabilize edilmiş zemin matrisine polipropilen elyaf kullanılmıştır. Zemine kuru kütlede %0, %5, %10 ve %15 oranlarda kireç ve kirecin %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %75", oranında nano-zeolit ile stabilize edilmiştir. Stabilize edilmiş zemine %0, %0.5, %0.75, %1 ve %1.25 oranlarında polipropilen elyaf takviye edilmiştir. Sonuçlar %15 kireç-zeolit ve polipropilen elyaf içeren numunenin çevre koşullarına karşı mükemmel dayanıklılığa sahip olacağını ve serbest basınç dayanımı ve çekme dayanımı açısından çok iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda zeolit ve polipropilen elyaf münferit olarak çimento ile zemin özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu malzemelerin her ikisinin bir arada kullanıldığı bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu sebepten yapılmış bu tez

alışmasında imento ile gulendirilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf farklı oranlarda bir arada kullanılarak zeminlerin mekanik davranışını araştırılmıştır.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRME

Zemin iyileştirme, zeminin taşıma kapasitesini artırmak, dayanıklılığını artırmak veya yer değiştirmelerini azaltmak için uygulanan tekniklerin tümüdür. Genellikle inşaat projelerinde zemin özellikleri istenilen düzeye getirmek amacıyla iyileştirme yapılır.

Geoteknik mühendisliği alanının bir alt dalı olan zemin iyileştirmede, uygulamaların gelişmeye başladığı 20 yüzyılın ortalarından bugüne kadar önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Çoğu teknik uygulama ve optimizasyon açısından ciddi değişikliklere uğramıştır. Son yıllarda kullanılabilir arazi kıtlığıyla birleşen alt ve üst yapılarının hızlı gelişimi, nüfusun artması, ekonomik açıdan yükselmesi, ihtiyaçların çeşitlenmesi ile birlikte yapı projelerde artış yaşanmıştır. Bununla birlikte problemler zeminler üzerine yapı inşa edilmesi, birçok projede derin temeller kullanımı ve zemin iyileştirmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yumuşak ve gevşek zeminlerde yapılan inşaatlar sırasında karşılaşılan sorunlar, stabilite ve yer değiştirme problemleri olarak ortaya çıkar. Eğer yumuşak veya gevşek zeminlerde zemin iyileştirmesi yapılmazsa, yapılar bazen yüksek deformasyonlara, bazen de kaymalara yol açarak kullanılamaz hale gelebilir. Gevşek kum zeminlerde taşıma kapasitesini artırmak ve sıvılaşma riskini azaltmak için, yumuşak kil zeminlerde ise genellikle taşıma kapasitesini artırmak, konsolidasyon oturmalarını azaltmak veya sınırlamak amacıyla zemin iyileştirmesi yapılmaktadır. (Öztorprak, 2016).

Zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirme veya zemin malzemelerini istenen bir işlevi yerine getirmek için değiştirme temel fikri yeni değildir. Yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve katkıların kullanımı gibi zemin iyileştirmenin temel ilkelerinden bazıları binlerce yıldır var olmuştur. Milattan 2000-3000 yıl önce Çin uygarlıklarından yazılı eserler, taş ve ahşap katkıların kullanımı tanımlanmıştır (ASCE 1978). 1900'lü yıllarda Mısır'da çakıllı/kaya dolgu barajların yapımında sızıntı kontrolü için dolgu malzemesinin eklenmesiyle zemin iyileştirilmesinin kullanıldığı bildirilmiştir (Charles, 2002).

Zemin özelliklerinin yapılacak proje kriterlerine uyarlanması, zeminlerin iyileştirilmesi kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Zeminlerin hangi özelliklerinin nasıl iyileştirilebileceğine dair teknolojinin ve mühendisliğin nasıl kullanılabileceği ise geoteknik mühendisliğinin en önemli konusu haline gelmiştir. Mühendisler, yapıları güvenli ve en

ekonomik şekilde inşa etmekle yükümlüdür. Zeminlere oturtulan yapılardan aktarılan gerilmeler zeminin taşıma kapasitesinde olduğu durumlarda genellikle yüzeysel temeller kullanılarak çözüm aranır. Taşıma kapasitesi yetersizse ve beklenen oturma miktarı yüksekse ya derin temel tasarımı ya da zemin iyileştirilmesi ile zeminlerin taşıma gücü istenilen değerlere ulaştırılır. Derin temel uygulanması ile zeminlerin taşıma gücünün artırılması, zaman ve ekonomik nedenlerle alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmasına ve dolaylı olarak zemin iyileştirme yöntemlerinin hızla gelişmesine neden olmuştur (Tachir, 2015).

Bu bölümde, zemin iyileştirme yöntemlerinin genel kategorileri ve amaçları ile mühendislik parametreleri tartışılmaktadır. Ayrıca, eski uygulamaların kısa bir tarihçesi de sunulmaktadır.

3.1 Zemin İyileştirmenin Amacı

Zeminin taşıma kapasitesinin düşük olduğu veya zayıf zemin koşullarının olduğu alanlarda, inşaat projelerinde kullanılacak temellerin yetersiz kalması ve yapıların çökmesi riski artar. Bu durumlarla karşılaşıldığında zemin iyileştirme gereklidir. Zayıf zemin koşulları, zemin kazarak ve zemin değiştirerek veya belki de derin temeller kullanarak kolayca halledilebilirken zemini bir tür iyileştirme yoluyla yerinde iyileştirmek genellikle daha uygun maliyetlidir (Schaefer vd., 2012).

Schaefer vd., (2012) zemin iyileştirme yöntemlerinin genellikle bir veya daha fazla birincil işlevi yerine getirdiğini belirtmektedir. Bu işlevler şunlardır:

- Zeminin kayma mukavemetini ve taşıma kapasitesini artırmak,
- Yoğunluğu artırmak,
- Geçirgenliği azaltmak veya artırmak,
- Gerilmeler altında şekil değiştirmelerin azaltılmak,
- Şişme ve büzülme azaltmak,
- Erozyonu önlemek veya geciktirmektir.

Özaydın, (2012) tarafından belirtildiği gibi, zemin iyileştirme teknolojilerinin birçok çeşidine çevre dostu bir yaklaşım sunarak çevresel amaçları karşılayabileceği gösterilmiştir. Bu amaçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Artık malzemelerin değerlendirilmesi,
- Yüzeysel su kaynaklarının korunması için yüzey stabilizasyonu,
- Yeraltı sularının akım yönleri ve kalitesini korunması,
- Atık malzemelerin depolanması,
- Zeminlerden inşaat malzemesi olarak yararlanma.

3.2 Zemin iyileştirme Yönteminin Seçimi

Zemin iyileştirme yöntemi seçimi, projenin gereksinimlerine, zeminin özelliklerine, çevresel faktörlere ve maliyetlere göre yapılmalıdır. Aşağıda zemin iyileştirme seçiminde dikkate alınması gereken bazı faktörler sıralanmıştır.

- Projenin gereksinimleri: Zeminin üzerinde inşa edilecek yapı veya yapının tipi, yükü, boyutu ve fonksiyonu, zemin iyileştirme yöntemi seçiminde önemli faktörlerdir. Örneğin, bina veya köprü inşaatı için zemin sıkıştırması yöntemi uygun olabilirken, bir baraj inşaatı için vakumla susuzlaştırma yöntemi tercih edilebilir.
- Zemin özellikleri: Zeminin türü, özellikleri, su içeriği, taşıma kapasitesi, geçirgenliği, kayma direnci ve oturma potansiyeli gibi faktörler uygun zemin iyileştirme yöntemi seçiminde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir.
- Çevresel faktörler: Çevresel faktörler, zemin iyileştirme yöntemi seçiminde önemli bir faktördür. Örneğin, yakındaki binaların titreşim duyarlılığı, su kaynakları, yakındaki yerleşim yerleri, arkeolojik sitler ve koruma alanları seçimde göz önünde bulundurulması gereken faktörlerdir.
- Maliyet: Zemin iyileştirme yöntemi seçimi, projenin bütçesi ile sınırlıdır. Her yöntemin maliyeti farklıdır ve projenin maliyet analizi doğru yöntem seçiminde önemli bir faktördür.
- Zaman faktörü: Zemin iyileştirme yöntemi seçimi, projenin tamamlanması için gereken süreyi de içermelidir. Bazı yöntemler daha hızlı sonuç verirken, bazıları daha uzun bir süre gerektirir. Bu faktör, projenin zaman çizelgesi ve takvimi için önemli bir faktördür.

Bu faktörlerin yanı sıra, yerel düzenlemeler ve yönetmelikler, proje bölgesindeki deneyimli müteahhitlerin tavsiyeleri, zemin iyileştirmede kullanılacak makinelerin ve ekipmanların mevcudiyeti gibi faktörler de dikkate alınmalıdır.

3.3 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme yöntemleri, son yıllarda hızla gelişmiş ve endüstriyel projelerde geniş ölçekli uygulama alanı bulmuştur. Güvenli ve güvenilir inşaat yapıları için zemin koşullarının iyileştirilmesi amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri, özellikle yumuşak ve zayıf zeminler, temeller, kaldırımlar veya bitümlü yüzey tabakaları olan zeminlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme süreçlerini içeren yaklaşımlar genellikle iyileştirmelerin sağlandığı teknikler veya yöntemlere göre yüzeysel iyileştirme ve derin iyileştirme olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Bu yöntemler, zeminin özelliklerine, uygulanacak yükün türüne ve büyüklüğüne, projenin zaman ve maliyet planlamasına ve bölgenin jeolojik özelliklerine göre belirlenir. Bazı zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

3.3.1 Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri, katkılı veya katkısız zeminin ince tabakalar halinde serilmesi, kompaksiyon ile sıkıştırılması ve drenaj uygulanması gibi teknikleri içermektedir. Katkılı stabilizasyon, zeminin çimento, kireç, uçucu kül veya bitüm ile karıştırılarak sıkıştırılması ve boşluk oranının azaltılmasıyla özelliklerinin iyileştirilmesi işlemidir.

3.3.1.1 Drenaj Yöntemi

Yeraltı suyu genellikle herhangi bir inşaat mühendisliği inşaatında ele alınması gereken en önemli sorunlardan biri olarak kabul edilir. İnşaat işletimi sırasında, kayma direncini artırmak veya donma hasarı tehlikesini azaltmak için sızıntı basıncını ortadan kaldırmak gerekebilir. Susuzlaştırma sistemleri ve drenajlar, inşaat öncesi ve sonrasında zemin durumunu iyileştirmek için kullanılan iki yöntemdir. Bu yöntemler, boşluk suyu basıncını etkili bir şekilde azaltarak zeminin stabilitesini artırabilir ve inşaat işletimini kolaylaştırabilir. Drenaj yöntemi, inşaat projelerinde yer altı sularının kontrol altına alınması ve tahliye edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, zemine yerleştirilen drenaj

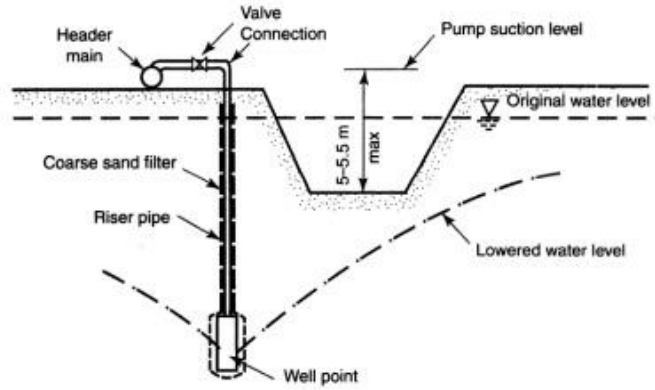
sistemleri vasıtasıyla suyun toplanmasını ve tahliyesini sağlar. Genellikle betonarme veya plastik drenaj borularından oluşur ve zemine gömülerek drenaj kanallarının oluşturulmasını sağlar. Bu borular, zeminden suyun toplanmasını ve drenaj kanallarına taşınmasını sağlar. Drenaj kanalları daha sonra, suyun tahliye edilmesi için bir drenaj sistemi veya akarsu ile birleştirilir. Bu yöntem, özellikle yeraltı su seviyesi yüksek olan alanlarda etkili bir şekilde çalışır. Drenaj yöntemi, zeminin kararlılığını artırır, yapıların dayanıklılığını sağlar ve su kaynaklı hasarların önlenmesine yardımcı olur.

Susuzlaştırma sistemleri temel olarak su tablasının gerekli bir seviyeye kadar indirilmesi ve bu seviyenin altında kuyu, galeri veya hendeklere yerleştirilmiş bir toplayıcı sistemi kurulmasından oluşur. Kolektörlerde toplanan su pompalanır ve hafriyattan veya doğal zeminden sürekli pompalama maliyetli bir iştir ve çevredeki zeminden sürekli akış bitişik yapıların stabilitesini tehlikeye atabilir. Daha fazla yoğun akış, açık bir kazıda kenarların aşınmasına veya çökmesine neden olabilir. Belirli durumlarda yukarıya doğru sızma nedeniyle kazı tabanında dengesizlik olabilir. Öte yandan bazı durumlarda su tablasını alçaltmak için diğerlerinde boşluk basıncını ve sızıntı kuvvetlerini azaltmak için akışı kontrol etmeye hizmet eden drenler sağlanmıştır. Uygun bir drenaj yönteminin seçilmesini sağlamak için işe başlamadan önce gerekli tüm bilgilerin edinilmesi önemlidir ve bu husus saha araştırma aşamasında ihmal edilmemelidir (Raj, 1999).

• Kuyu-Nokta Sistemleri

Kuyu-nokta sistemleri, zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir ve genellikle yumuşak zeminlerde kullanılır. Bu sistemler, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve su seviyesini düşürmek amacıyla uygulanır. Kuyu noktaları küçük kuyu ızgaralarıdır, 50-80 mm çapında ve 0.3-1 m uzunluğundadır. Kuyu nokta sistemi yerden alçaltma kazı etrafına kuyu noktalarının yerleştirilmesini içerir. Kuyu noktaları bir başlık borusuna bağlanır ve ardından bir kuyu noktası pompasına bağlanır. Filtre kuyusuna yerçekimi ile akan su, vakum ile kolektör ana hattına kadar çekilir ve pompa vasıtasıyla dışarı atılır. Şekil 3.1’de kuyu noktası sisteminin tipik bir kurulumu göstermektedir. Eğer saha erişilebilirse ve drene edilecek su içeren tabakalar çok derin değilse kuyu nokta sistemi en uygun yöntemi olmaktadır. Ekipman oldukça basit, ucuz ve hızla kurulur. Kuyu noktaları genellikle su tablasının çok fazla indirilmesinin gerekmediği yerlerde kullanılır. Büyük kazılarda veya su tablasının altındaki kazı derinliğinin 10 m’den fazla olduğu veya artezyen basıncının durumlarda, derin

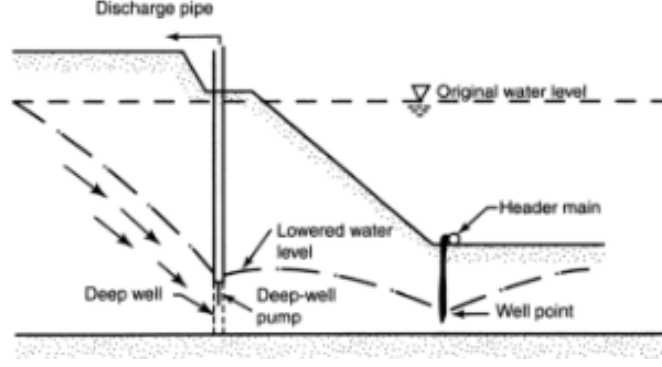
kuyular ve türbin pompalar kullanılmalıdır. Kuyu nokta sisteminin ek avantajı, suyun doğrudan yerden alınıp filtrelenmesiyle birlikte suyun içinde taşıdığı askıdaki katı maddeleri çok az taşıması veya hiç taşımasıdır. Kuyu-nokta sistemleri, zeminin özelliklerine, uygulanacak yükün türüne ve büyüklüğüne, projenin zaman ve maliyet planlamasına ve bölgenin jeolojik özelliklerine göre belirlenir. Bu sistemler, doğru bir şekilde uygulandığında, yapıların daha güvenli ve sağlam olmasını sağlar (Raj, 2008).



Şekil 3.1: Kuyu noktası sisteminin kurulumu (Raj, 2008)

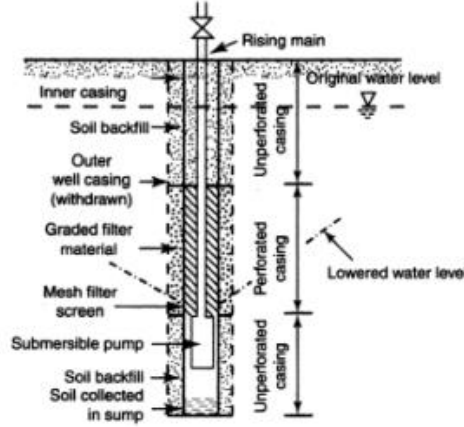
• Derin Kuyu Drenajı

Derin kuyu drenajı, suyun yer altından toplanması ve tahliye edilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat projelerinde zeminin kurutulmasını veya altında su bulunan alanların drenajını sağlamak için kullanılır ve zemindeki suyu toplamak için özel olarak inşa edilmiş derin kuyuların kullanılmasını gerektirir. Kuyular, zemindeki suyun yer altından toplanması için özel olarak delinir ve bir drenaj borusu ile bağlanır. Drenaj boruları, suyun kuyudan tahliye edilmesini sağlar ve toplanan suyu bir drenaj kanalına veya akarsuya yönlendirir. Kuyu nokta sisteminin aksine derin kuyu su tahliyesi inşaat alanının dışına kurulabilir ve gerekli kazı derinliğine kadar drenaj yapılabilir. Derin kuyular yeraltı suyu tablasını düşürmek için belirli durumlarda kuyu nokta sistemi ile birleştirilebilir (Şekil 3.2). Bazı saha koşullarında artezyen basıncını azaltmak için derin kuyular da uygun ve bir derin kuyu sisteminin kurulum maliyeti nispeten yüksektir. Bu nedenle süreç genellikle kuru havuzlar gibi inşaat süresi uzun olan işlerle sınırlıdır.



Şekil 3.2: Derin kuyu drenaj sistemi (Raj, 2008)

Derin bir kuyu kurma prosedürü, kuyu muhafazasından yaklaşık 300 mm daha büyük bir çapa sahip muhafazalı bir sondaj deliği batırmaktır. İkincisinin çapı, dalgıç pompaların boyutuna bağlıdır. Sondaj deliği tamamlandıktan sonra iç kuyu kovanı yerleştirilir. Zeminin susuzlaştırılmasının gerekli olduğu uzunluk boyunca delikli bir boru yerleştirilir. Kademeli çakıl filtre malzemesi kuyu muhafazası ile dış kuyu muhafazası arasında susuzlaştırılacak uzunluk boyunca yerleştirilir. Dış kaplama, filtre malzemesi yerleştirildikçe aşamalı olarak geri çekilir. Örgü filtre ekran üzerindeki boşluk, mevcut herhangi bir malzeme ile doldurulur. Derin kuyu drenaj tamamlanan kurulumun detayları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Derin kuyular duruma göre 10 ila 100 m aralıklarla açılır (Raj, 2008).

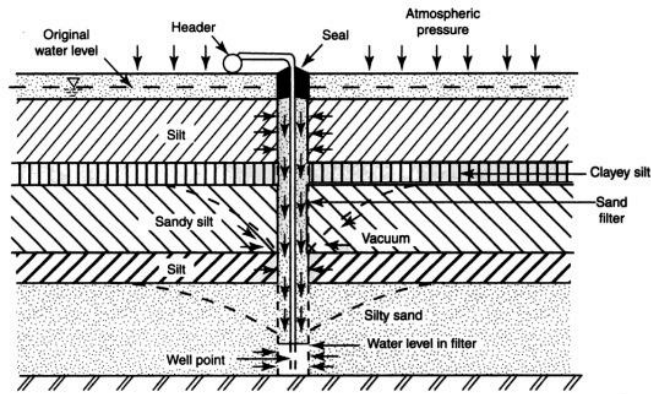


Şekil 3.3: Derin kuyu drenaj tamamlanan kurulumun detayları (Raj, 2008)

• Vakumlu Susuzlaştırma Yöntemi

Vakumlu susuzlaştırma yöntemi, suyun çıkarılmasını ve zeminin kalan kısmının kurumasını hızlandırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat projelerinde zeminin kazılması, temel oluşturulması veya su altında yapılan işlerde kullanılır. Özellikle çamurlu

zeminlerde ve su seviyesi yüksek alanlarda kullanılır. Bu yöntem, zeminin su içeriğini azaltarak zeminin sıkışmasını ve yoğunlaşmasını sağlar. Böylece zeminin taşıma kapasitesi artar ve daha fazla yük taşıyabilir hale gelir. Bu tür zeminler bir vakum kuyusu veya kuyu nokta sistemi vasıtasıyla stabilize edilebilir. Bir vakumlu susuzlaştırma sistemi yüzeyin birkaç metre yakınına kadar uzanan serbest bir drenaj kum filtresiyle çevrelenmiş elek ve yükseltici borulara sahip kuyulardan veya kuyu noktalarından oluşur. Kuyunun kalan kısmında bentonit veya geçirimsiz zemin contası sağlanır. Kuyu süzgecinde ve kum filtresinde vakum sağlayarak kuyuya veya kuyu noktasına doğru akış üreten hidrolik gradyan artar. Uygun su tahliyesi için kuyular arasında daha yakın mesafe bırakılması önemlidir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Vakumlu susuzlaştırma yöntemi (Raj, 2008)

3.3.1.2 Yüzeysel Kompaksiyon

Yüzeysel kompaksiyon en yaygın kullanılan ve en eski yöntemlerinden biridir. Yol inşaatın, pistin, setin veya herhangi bir yumuşak veya gevşek temelin inşası, yapının döşenmesi için sıkıştırılmış bir tabana ihtiyacı var. Sıkıştırılacak derinlik daha az ise o zaman zemin yüzeyindeki sıkıştırma tek başına sorunu çözebilir. Yüzeysel sıkıştırma daha az vasıflı işgücü gerektirir ve genellikle mevcut teknikler arasında en ekonomik olanıdır. En çok kullanılan yüzeysel sıkıştırma cihazları düz silindir ve tokmak makinelerdir. Lastik tekerlekli, keçi ayaklı, titreşimli ve ızgara silindirler gibi bütün geleneksel silindirler kullanılabilir. Tüm makineler pratik amaçlar için taneli zeminlerin yaklaşık 2 m derinliğine kadar titreşimli silindirler kullanılarak yüzeyi sıkıştırılabilir. Kohezyonlu zeminlerde herhangi bir merdane ve tokmak kullanılarak gerekli sıkıştırma yüzdesi elde edilebilir, ancak vibrasyonlar etkili değildir. Ana yolları ve hava meydanları için alt zeminler ve tabanlar

sıralarında ağır lastik tekerlekli silindirler avantajlı bir şekilde kullanılabilir. Su tutan yapılar için her katmanı verimli bir şekilde yapıştırmak amacıyla bir keçi ayaklı silindir kullanılabilir (Raj, 2008).

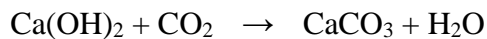
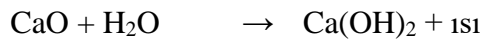
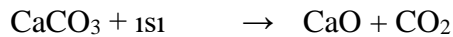
Yüzeysel kompaksiyonun temel amacı, zemindeki hava boşluklarını ve boşluk oranını azaltmak, kayma mukavemetini artırmak, oturmaları azaltmak, su geçirimsizliği azaltmak, sıvılaşma potansiyeli azaltmak ve dolguların yerleştirilmesi sırasında işi kolaylaştırmaktır (Patel, 2019).

3.3.1.3 Kireç ile Stabilizasyon

Kireç stabilizasyonu, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için kireç ve suyun zemine ilave edilmesi ve karıştırılması yoluyla gerçekleştirilen bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin stabilizasyonu için kullanılır. Stabilizatör olarak kirecin uygulanması 5000 yıldır kullanılmaktadır (Schoute, 1999).

Kireç binaların altyapılarda, Roma'daki Appian yolu ve Tibet'teki Sersi piramitleri gibi tarihi yerlerde kullanılmıştır. Bu yapılar kil ve kireç karışımları kullanılarak inşa edilmiştir (Winterkorn ve Pamukcu, 1991).

Tipik olarak kimyasal bileşimlerine bağlı olarak üç tip kireç katkı maddesi vardır. Sönmemiş kireç kimyasal olarak kalsiyum oksittir (CaO) ve hidratlı kireç kalsiyum hidroksittir (Ca(OH)₂). Üçüncü tip ise zemin stabilizasyonunda daha az kullanılan kalsiyum karbonattır (CaCO₃). Bu üç türün kimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir (Sherwood, 1995):



Bu işlemin temel özelliği puzolanik reaksiyonlara iyon değiştirme reaksiyonlarına katılan kalsiyumun salınmasıdır. Zeminlerin kireç stabilizasyonu için puzolanik reaksiyonlar zemin tarafından sağlanan reaktif silisli ve alüminaya bağlıdır. Sonuç olarak, kireç stabilizasyonu, zeminin dayanıklılığını artırmak için kireç ve suyun zemine ilave edilmesi ve karıştırılması

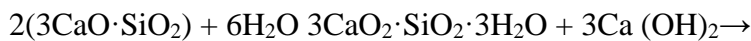
yoluyla gerçekleştirilen etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde kullanılır ve zeminin geçirgenliğini azaltarak su geçirmezlik özelliğini de artırabilir.

3.3.1.4 Çimento ile Stabilizasyon

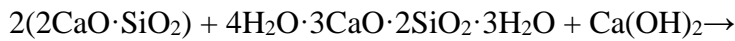
Çimento stabilizasyonu yıllardır uygulanmaktadır ve yüksek dayanımlı zemin-çimento karışımları ile sonuçlanan ve bu sayede üzerlerine inşa edilen altyapının performansını artıran popüler bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Portland çimentosunun hidrasyon reaksiyonları, karmaşık puzolanik aktivite yoluyla zemin mukavemetini artıran bileşiklerin ve jellerin üretilmesi nedeniyle oluşur (Nelson ve Miller, 1992). Bu bağlanma yalnızca işlenmiş malzemelerin yapışkan doğasını geliştirmekle kalmaz, daha yüksek yüklemeye dayanabilirler, aynı zamanda nem emiliminden zararlı donma ve çözülmeden şişmelerini ve yumuşamalarını önler (Bugge ve Bartelsmeyer, 1961).

Granüler zeminlerdeki çimentolama etkisi, çimento hamurunun agregalardaki boşlukları doldurmaması dışında betonunkine benzer çimento nemin mevcudiyeti ve daha ince parçacıklar arasındaki temas noktalarında birleşme eğilimindedir (Bugge ve Bartelsmeyer, 1961). Çimento ve şişen zemin arasındaki reaksiyonlar kireç muamelesinde meydana gelenlere benzerdir (Nelson ve Miller, 1992).

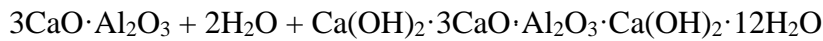
Çimentonun kimyasal işlenmesi sırasındaki reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Schoute, 1999).



(trikalsiyum silikat) (su) (tobermorit jel) (kalsiyum hidroksit)



(bikalsiyum silikat) (su) (tobermorit jel) (kalsiyum hidroksit)



(trikalsiyum alüminat) (kalsiyum hidroksit) (tetra kalsiyum alüminat hidrat)

Kimyasal reaksiyonların sonunda puzolanik bileşiklerin oluşumu, zeminin mukavemetinin ve işlenebilirliğinin artmasına neden olur. Ticari piyasada farklı derecelerde çimento malzemesi mevcuttur. Tip I, betonarme yapılarda kullanıma uygun genel amaçlı çimentodur. Tip II, orta miktarda sülfat içeren su veya zemindeki yapılar için veya ısı birikmesi söz

konusu olduğunda kullanılır. Tip III, çimento erken bir aşamada, tipik olarak bir haftadan kısa sürede yüksek dayanımı sağlar. Tip IV çimento, özellikle barajlar gibi büyük beton yapılar için kullanılmak üzere hidrasyon sırasında üretilen ısıyı azaltmaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Tip V, çimento sülfat içeriği yüksek olan zemin ve sudan kaynaklanan kimyasal saldırılara karşı dayanıklıdır (Wattanasanticharoen, 2000).

Çimento sınıfı tipinin seçimi tamamen zemin tipine, istenen dayanıma ve tasarım kriterlerine bağlıdır. Optimal zemin-çimento karışımı tipik olarak dayanımı gerekliliklerine göre belirlenir. Sonuç olarak, çimento stabilizasyonu, zeminin dayanıklılığını artırmak için çimento ve suyun zemine ilave edilmesi ve karıştırılması yoluyla gerçekleştirilen etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde kullanılır ve zeminin geçirgenliğini azaltarak su geçirmezlik özelliğini de artırabilir.

3.3.1.5 Uçucu Kül ile Stabilizasyon

Kömür külü termik santrallerde kömürün yakılması sırasında ortaya çıkan yan ürünlerden biridir (Ferguson, 1993). Tipik olarak uçucu külden kazan borularını kaplayan kazan cürufu ve taban külü oluşur. Kömür külünden geri kazanılan uçucu kül miktarı kömürün cinsine brülörlere ve kazana göre değişmekle birlikte genellikle %65 ile %85 arasındadır. Uçucu kül, yanma odasının egzoz gazlarının süspansiyonundan toplanan ve elektrostatik bir çökeltici kullanılarak çıkarılabilen ince taneli fraksiyonudur. Kazan külü nispeten daha kaba ve daha yoğun bir malzemedir ve yerçekimi ile daha düşük seviyede toplanır (Nicholson ve Kashyap, 1993).

ASTM C'593, (2019) standardına göre uçucu kül elektrik jeneratörlerinden kullanılan kömürün orijinal kaynağına bağlı olarak C ve F sınıfına sınıflandırılır. F sınıfı uçucu kül bitümlü veya antrasit kömürün yakılmasıyla üretilirken, C sınıfı uçucu kül, alt bitümlü veya linyit kömürlerinin yakılmasından elde edilir. Bu iki tip arasındaki temel fark, kalsiyum, silika, alümina miktarı ve demir içeriğidir (Punthutaecha vd., 2006).

Uçucu kül ile stabilizasyon, birçok farklı uygulama alanında kullanılır. Bunlar arasında beton, karayolu altyapıları, zemin stabilizasyonu, çevre temizliği ve madencilik atıklarının yönetimi yer almaktadır. Bu nedenle, uçucu kül stabilizasyonu, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olarak görülmektedir. Uçucu kül ile stabilizasyonu hem yapı

malzemelerinin performansını artırmak hem de çevresel etkileri en aza indirmek için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat sektörü ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3.1.6 Bitüm ile Stabilizasyon

Zemin stabilizasyonu için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, bitüm zeminin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini artırmak için zemine karıştırılır. Bitüm, petrol rafinerilerinde üretilen ve genellikle yol yapımında kullanılan bir yan üründür. Bu malzeme, zeminle karıştırıldığında, zeminin mukavemetini artırır ve aynı zamanda suya karşı direncini artırarak erozyonu önlemeye yardımcı olur. Bitüm ile stabilizasyon özellikle zeminde yüksek nem veya su içeriği varsa, zeminin taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını artırmak için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, yol yapımı, havaalanı pistleri, otoparklar, limanlar ve diğer benzeri yapılar için kullanılabilir. Bitüm ile stabilizasyon, çevre için potansiyel bir risk oluşturabilir. Bitüm, çevreye zararlı maddeler içerdiğinden, bitümle stabilizasyon yapılan alanların çevresel etkileri dikkate alınmalı ve bu yöntemin uygun olduğu durumlar seçilmelidir. Ayrıca, bu yöntemin maliyeti, diğer stabilizasyon yöntemlerine kıyasla daha yüksek olabilir.

3.3.2 Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri

Derin zemin iyileştirme yöntemi, zeminin taşıma kapasitesini artırmak veya zeminin yer değiştirmesini azaltmak için kullanılan bir geoteknik mühendislik tekniğidir. Bu yöntem, birçok farklı durumda kullanılabilir, örneğin köprü, bina, baraj, kanalizasyon, liman ve havaalanı inşaatlarında. Başlıca derin zemin iyileştirme yöntemlerini önyükleme, kum drenler, prefabrik drenler, dinamik kompaksiyon, vibro kompaksiyon, kompaksiyon kazığı, patlatma, taş kolon ve jet grout yöntemi olarak sıralanabilir.

3.3.2.1 Önyükleme

Önyükleme, inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. İlk olarak 19. yüzyılın sonlarında İngiltere'de kullanılmıştır. Bu yöntem, temel zemininde meydana gelebilecek oturmaları azaltmak ve zeminin mukavemetini artırmak için kullanılır. Yapının inşası öncesinde, inşaat sahası kum ve çakıl dolgu ile geçici olarak yüklenir. Bu dolgu

ağırlığı altında temel zeminini oluşturan tabakalar konsolide olur ve zeminin mukavemeti artar. Zemin, uygulanan konsolidasyon basıncına bağlı olarak güçlenir. Sonrasında dolgu kaldırılır ve yapı inşa edilir. Bu süreçte zemin, önceden konsolide edildiği için yapıdan aktarılan yükler altında oluşabilecek oturmalar tamamlanmış veya azaltılmış olur. Önyükleme yöntemi, genellikle yumuşak ve düşük permeabiliteye sahip kil tabakaları üzerinde uygulanır. Ancak, temel zemininde kayma ve göçmelerin önlenmesi ve konsolidasyonun tamamlanabilmesi için uzun bir bekleme süresi gerektirir. Bu bekleme süresini kısaltmak amacıyla zemin içerisine düşey kum drenler veya yapay drenaj şeritleri yerleştirilmesi olumlu sonuçlar vermektedir. Böylece zemin içindeki su, yatay ve dikey yönde hareket edebilir ve drenaj kanalları aracılığıyla zeminden uzaklaştırılır, böylelikle zemin tabakasının konsolidasyonu daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. (Ayan, 2009).

3.3.2.2 Kum Drenleri

Kum drenleri, zemine kazık çakarak veya delerek temiz kum filtresi kolonu oluşturan bir zemin güçlendirme yöntemidir. İlk kez 1925 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Oakland kentinde kullanılmıştır. Bu yöntem, kazık boyunca tam çapı korumak için kazık çakma ve delme işlemiyle kum drenleri oluşturulması gerektiğinden özel bir tekniktir. Bu yöntem, düşük permeabiliteye sahip kil tabakalarında konsolidasyon hızını artırabilir. Bunun için kum drenleri kullanılarak, kil içindeki drenaj yolunun kısaltılması ile fazla boşluk suyunun dağılması sağlanır. Yüksek sıkışabilirlik özelliğine sahip kil tabakalarına dolgu yapıldığında, kum drenleri yapılan ek harcamaların karşılığını fazlasıyla vererek kayma direncini artırır. Kum drenleri, konsolidasyon hızını hızlandırılması gereken durumlarda ek dolgu malzemeleri ile birlikte kullanılabilir ve oturmalar istenen seviyeye ulaşıldığında ek dolgu malzemeleri kaldırılabilir. (Ayan, 2009).

Avantajlarına karşı bu yöntemin, bazı dezavantajları da var:

- Kum süzgeçlerinin içi boş mandrelleri aşağı indirerek montajı her dreni çevreleyen zeminin bozulmasına neden olabilir.
- Doldurma sırasında, boşluklara yol açabilecek kum kabarması oluşabilir.
- Büyük çaplı kum tahliyesi nedeniyle inşaat sorunları ve/veya bütçe sorunları ortaya çıkabilir (Kirmani, 2004; Stapelfeldt, 2006).

Kum drenleri, zemin iyileştirmede sıklıkla kullanılan etkili bir yöntemdir. Ancak, kullanılacak olan yöntem ve malzemelerin seçimi, zemin koşulları ve yapılacak işin özelliklerine göre belirlenmelidir (Varghese, 2005).

3.3.2.3 Prefabrik Drenler

Kum drenleri gibi aynı amaç için kullanılan düşey şeritler halindeki, yüksek geçirgenliğe sahip oluklu kâğıt veya plastikten yapılmıştır. Bu yöntem ilk olarak İskandinavya'da ortaya çıkmış ve daha sonra Japon mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Düşey şeridin ucu, çelik bir çubuğa bağlanmış olan bir mandrel ile tamamlanmıştır. Mandrel çubuğun kendi ağırlığı altında ve bir titreşim cihazı yardımıyla çubuk ucuna hızlı bir şekilde itilerek istenen derinliğe yerleştirilir. Daha sonra mandrel geri çekilir ve tüm sistem, çekme aracına monte edilmiş bir direk üzerinde yönlendirilebilecek yükseklikte bir çubuğa sahip olan bir araca yerleştirilir.

Plastik drenlerin kum drenlere göre avantajları şunlardır:

- Hızlı kurulum: Plastik drenlerin içeriye sokulma hızı çok yüksektir, 20m'lik derinlik için sadece 3 dakika sürer. Bu, kısa sürede büyük bir alanın drenajını sağlamaya olanak tanır.
- Süreklilik: Gözenekli plastik tüplerle çevrelenmiş prefabrik drenler, kum drenlerinin kullanımı süresizlik problemini ortadan kaldırabilir, sağlamlığı oturmaya bakılmaksızın drenajın sürekliliğini sağlar.
- Hızlı konsolidasyon: Plastik drenlerin birbirine yakın yerleştirilmesi, hızlı konsolidasyonu sağlamak için önemlidir.
- Ayarlanabilir aralıklar: Plastik drenler genellikle 20 ile 25 metre derinliğe kadar yerleştirilir ve bu drenler arasında 1-2 metrelik mesafeler bulunur. Bu mesafeler, zemin iyileştirme sürecini 2-3 aya indirirken, istenen konsolidasyon oranını elde etmek için ayarlanabilir.

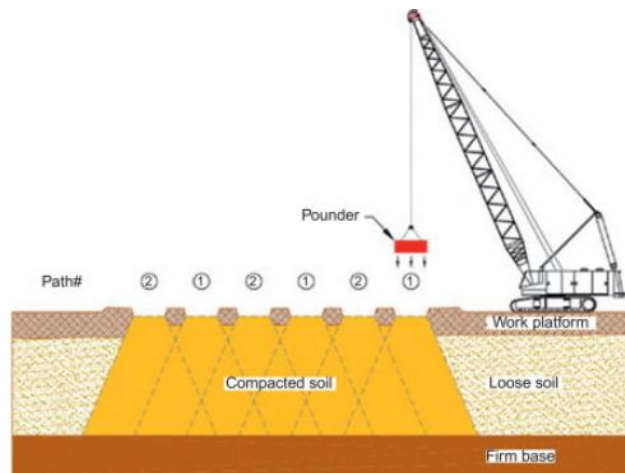
Bu avantajlar nedeniyle, plastik drenlerin kum drenlere göre tercih edilebilir olabileceği durumlar vardır. Ancak her iki yöntemin de farklı avantajları ve dezavantajları vardır, bu nedenle her proje özel olarak değerlendirilmelidir (Ayan, 2009).

3.3.2.4 Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon, zemine dinamik yükler uygulayarak zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve zemini stabilize etmek için kullanılan bir zemin stabilizasyon yöntemidir. Dinamik kompaksiyon, milattan 100 yıl sonra Romalılar tarafından ve 1800'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanıldığı bildirilen en eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir (Peter ve Nicholson, 2015).

Dinamik derin kompaksiyon olarak da bilenen dinamik kompaksiyon, 1960'ların ortalarında Louis Menard tarafından geliştirilmiştir. İşlem olarak zemin 12.5 m derinliğe kadar sıkıştırmak için yüzeyine ağır bir yük düşürmeyi içerir. Bu yöntem, kuleleri özel olarak inşa edilmiş olmasına rağmen ağırlığı düşürmek için bir döngü görev vinci kullanılarak yapılır. Vinç tipik olarak ağırlığı 15.4 ila 30.8 m yüksekliklerden tek bir hatla düşürmek için yeterli bir bomla donatılır ve ağırlığın serbest düşmesine izin vererek, ağırlığın yere çarpma enerjisini en üst düzeye çıkarır. Zemine düşürülecek ağırlık, vinç ve kablonun güvenli tek kapasitesinin altında olmalıdır. Ağırlık tipik olarak 10 ile 30 ton arasında değişir ve tekrarlayan dinamik kuvvetlere dayanacak şekilde çelikten yapılır (Şekil 3.5) (El-Reedy, 2017).

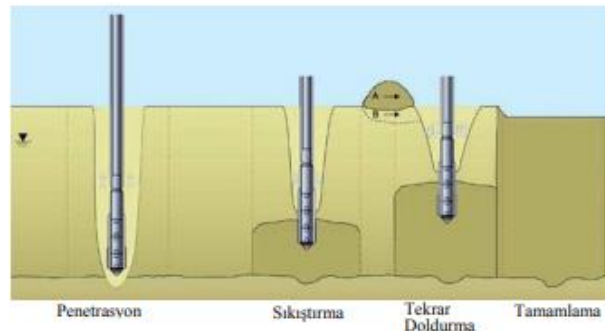
Dinamik kompaksiyon yönetimin amacı, temel oturmalarını azaltmak, sismik oturma ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak, dolgularda yapılaşmaya izin vermek, katı atıklarını yoğunlaştırmak ve çökebilir zeminlerdeki oturmaları azaltmaktır.



Şekil 3.5: Dinamik kompaksiyon şeması (Nicholson, 2015)

3.3.2.5 Vibro Kompaksiyon

Vibro kompaksiyon yöntemi, 1930'lu yıllarda Almanya'da kalın gevşek kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntemde, granüler zeminlerin sıkıştırılması için zemin içine yerleştirilen bir vibratör aracılığıyla yatay titreşimler uygulanır. Vibroflot adı verilen bir sonda, vinç ve uzatma boruları kullanılarak zemine yerleştirilir ve kendi ağırlığıyla birlikte su jeti veya basınçlı hava yardımıyla titreştirilir. Vibroflot, sonda üzerinde yer alan düşey bir eksene sahip olan ve titreşim oluşturan eksantrik bir ağırlıktan oluşur. Titreşim hareketi yataydır. Bu durumda, çapı 30 cm ile 45 cm arasında, uzunluğu 2 m ile 4.5 m arasında ve kütlesi 3 ton ile 8 ton arasında değişen bir silindirik vibratörün düşey eksen etrafında yatay dairesel hareketi söz konusudur. Bu hareket sonucunda oluşan enerji, zemine ya vibratör sondasının tam uzunluğu boyunca ya da sadece vibratörün ucundan aktarılır. Bu enerji miktarı, sondanın yerleştirildiği derinliğe bağlı olmaksızın sabittir. Vibratör, 1-2 m/dk. hızla zemine itilirken, zeminin içine girerek titreşim oluşturur. Aynı zamanda, etrafında bir çöküntü konisi oluşturur. Vibratör zemine girdikçe, su jeti de girme işlemine katkıda bulunur. Su jeti, sondanın zemine kolayca girmesine yardımcı olacak bir ortam yaratır, su zeminde kaynamaya benzer bir ortam oluşturur. Oluşan çöküntü konisinin içine, aynı zamanda dışarıdan kum-çakıl ilave edilerek çukur doldurulur (Şekil 3.6). Uygulanan titreşim sayesinde zemin gevşetilir. Bu sırada kuyunun tamamen su ile doldurulması ve göçmesinin önlenmesi gerekmektedir. Titreşen vibroflot yukarı doğru çekildiğinde 30 cm/dk. hızla, yukarıdan sıkışan malzemenin oluşturduğu koniye malzeme ilave edilerek kuyunun çeperlerinde zemin sıkıştırılır. Vibroflot, yanlarından uygulanan su jeti ile granüler malzemenin dibe çökmesini sağlar ve vibrasyon etkisiyle sıkışmasını temin eder. Sonda yukarı çekildiği sırada zemini sıkıştırırken, ilave edilen malzeme bu sıkışmayı artırır. Bu şekilde, sondanın çapından çok daha geniş bir sıkı zemin kolonu oluşturulur (Brown, 1977; Greenwood ve Kirsh, 1984).



Şekil 3.6: Vibro kompaksiyon uygulaması (Brown, 1977)

3.3.2.6 Kompaksiyon Kazığı

Kompaksiyon kazığı, gevşek kum tabakasına çakılarak zemini sıkıştırmak için kullanılan bir yerdeğiştirme kazığıdır. Bu yöntem, gevşek kum tabakalarının sıvılaşma potansiyelini azaltmakta ve taşıma gücünü arttırmaktadır. Kompaksiyon kazığı, zeminin sıkıştırılmasını hem borunun çakılması sırasında hem de dinamik etki yardımıyla gerçekleştirmektedir. Boru içerisindeki iri taneli dolgu malzemesi sıkıştırılırken muhafıza borusu yukarı çekilmektedir. Kompaksiyon kazıkları, Franki kazıkları olarak da bilinmektedir ve özellikle kum zeminlerde etkili bir çözüm sunmaktadır.

Kum kazıkların arasındaki mesafe genellikle 1.0-1.5 metre aralığında değişirken, kompaksiyon kazıkları daha uygun maliyet ve uygulama açısından tercih edilen bir seçenektir. Kompaksiyon kazıkları, vibroflot ve terraprobe sondalarına göre daha avantajlıdır. Suya doymuş zeminlerde etkili bir yöntem olan kompaksiyon kazıkları, özellikle büyük basınç ve çekme kuvvetlerini güvenle taşıyabilirler. (Ayan, 2009).

3.3.2.7 Patlatma

Deprem sırasında meydana gelen sismik dalgaların gevşek zemin tabakalarını sıkıştırdığı ve hacim küçülmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, patlatma yöntemiyle yerin içindeki bir noktada infilak ettirilen bir patlayıcının oluşturduğu titreşimi yoluyla gevşek zemin tabakalarını daha yoğun hale getirme hedeflenmektedir. Sondaj çamuru veya muhafaza borusuyla desteklenen kuyu kenarlarından istenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra patlayıcılar yerleştirilir ve kuyu ağzı kapatılır. Patlayıcı olarak dinamit veya trinitrotoluen (TNT) gibi malzemeler kullanılabilir. Yüksek verim için patlatmanın belirli bir sırada ve belirli zaman aralıklarla yapılması gereklidir. Patlatma, suya doymuş bir ortamda ani gerilme artışına neden olmakta ve ortam sıvılaşmaktadır. Boşluk suyu basıncının sönmülmesiyle, zamanla gevşek zemin yapısı daha yoğun hale gelir. Homojen bir şekilde sıkıştırılmak için, zeminin suya doymuşluk koşulu önemlidir. İnce tane oranının %20'den az olması halinde sıkıştırma artar. Patlatma yöntemiyle sıkıştırma işleminin sınırsız bir efektif derinliği vardır ve temiz kumlar ve siltli kumlar gibi rölatif sıklığı %50 ila %60'tan düşük olan zeminler için uygundur (Ergun vd., 2006).

3.3.2.8 Taş Kolon

Taş kolon, zeminin taşıma kapasitesini artırmak için kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Taş kolon yöntemi, ilk olarak 19. yüzyılın başlarında Almanya'da kullanılmıştır. Ancak, modern taş kolon yöntemi 1950'lerde İsveç'te geliştirilmiştir. İsveçli bir mühendis olan Johan Trygger 1955 yılında ilk defa taş kolon yöntemini uygulamıştır. Daha sonra Avrupa'da ve diğer ülkelerde de yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

Bu yöntemde, zemin içine delinmiş olan deliklerin içine özel bir cihaz yardımıyla taş malzeme yerleştirilir ve sıkıştırılır. Bu işlem, zeminde boşlukların doldurulması ve zeminin dayanıklılığının artırılması için yapılır. Taş kolon yöntemi, özellikle yumuşak, gevşek ve sulu zeminlerde etkilidir. Bu yöntem, köprüler, otoyollar, binalar ve diğer yapılar gibi büyük inşaat projelerinde kullanılır. Taş kolonlar, boyu 2-20 metre arasında değişen çelik boruların içine yerleştirilen taşlarla oluşturulur ve diğer zemin iyileştirme yöntemleri ile birlikte kullanıldığında daha iyi sonuçlar verir. Örneğin, zeminin önceden stabilize edilmesi, taş kolon yönteminin etkinliğini artırabilir. Ayrıca, zemindeki su hareketini de kontrol altına alarak, zayıf veya gevşek zeminlerde dayanıklılığı ve taşıma kapasitesini artırmak için etkili bir yöntemdir.

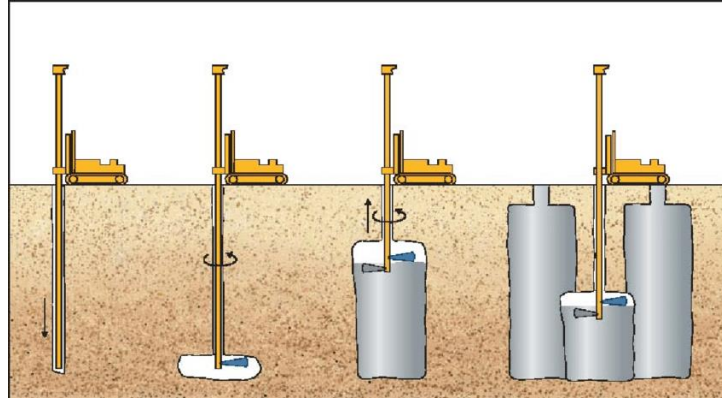
3.3.2.9 Jet Grout Yöntemi

Jet grout yöntemi, zeminin dayanıklılığını veya taşıma kapasitesini artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Jet grout yöntemi ilk olarak Japonya'da geliştirilmiş ve daha sonra Avrupa ve Amerika gibi diğer gelişmiş ülkeler tarafından da kabul edilmiştir. İtalya yapı temelleri üzerinde önemli çalışmalar yaparak jet grout teknolojilerinin gelişimine ciddi katkıda bulunmuştur. Bu yöntemi temellerin takviyesi, zeminlerin konsolide hale getirilmesi ve geçirimsizliğin sağlanması gibi çok yönlü bir yöntem olduğu için dünya genelinde benimsenmiş ve yaygınlaşmıştır. Ekonomik çözümler sunarak diğer yöntemlerin yetersiz kaldığı birçok durumda kullanılabilir. Bu nedenle jet grout yöntemi, inşaat sektöründe önemli bir yere sahiptir.

Jet grout yöntemi, tasarım derinliğine kadar sondaj yapıldıktan sonra, tijlerin ucundaki deliklerden yüksek basınçla enjeksiyon malzemesi zemine püskürtülürken aynı zamanda tijler döndürülerek yukarıya çekilir. Bu şekilde zemin içinde belirli boyutlarda ve çaplarda

bir kolon oluşturulur (Şekil 3.7). Kolon çapını genişletmek için jetleme sırasında çimento jeli yanı sıra hava ve su jetleri de kullanılabilir. Bu yöntem, zemin içinde bir karıştırma işlemiyle sağlam bir kolon oluşturarak diğer enjeksiyon yöntemlerinden farklılaşır.

Jet grout yöntemiyle zeminin taşıma kapasitesi artırılır, oturma ve sıvılaşma potansiyeli azaltılır ve kesişen jet enjeksiyonlarıyla geçirimsizlik azaltılarak sızdırmazlık sağlanır. Jet enjeksiyonu ile 5 metre çapında kolonlar oluşturmak mümkündür.



Şekil 3.7: Jet grout sistemi şematik gösterimi (Kovačević, 2006)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Malzemeler

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve malzeme karakterizasyon süreçleri tanıtılmıştır. Çalışmada yumuşak killi zeminlerin güçlendirilmesi için çimento, zeolit ve polipropilen elyaf kullanılmıştır.

4.1.1 Kil

Bu çalışmada kullanılan kil (K) zemin numunesi, Bartın yerleşim alanından inşaat kazı çukurundan alınmıştır (Şekil 4.1a). Zemin numunesi üzerinde laboratuvar ortamında TS1900-1 standardına göre tanımlanmaya yönelik piknometre deneyi, elek ve hidrometre analizi ile kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflanma Sistemine (USCS) göre zemin düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Ayrıca kil zemin numunesinin optimum su muhtevasında sıkıştırılarak serbest basınç dayanımı TS1900-2 ve dolaylı çekme dayanımı TS 7654 standartlarına göre belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan zemin genel görünümü Şekil 4.1b’de, SEM görüntüsü Şekil 4.1c’de, tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 4.3’te, fiziksel özellikleri Tablo 4.1’de ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

4.1.2 Çimento

Yapılan deneylerde CEM I 42,5 R Portland çimento (PC) TS EN 197-1 standardına uyumlu olarak Bartın Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Çalışmada kullanılan “PC”ye ait kimyasal özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



a)



b)

c)

Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan zemine ait a) alındığı konumu b) genel görünüm ve c) SEM görünümü

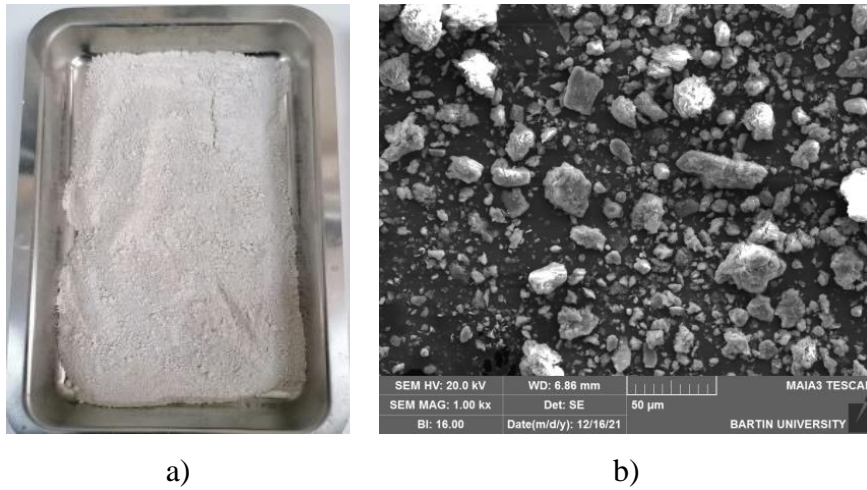
Tablo 4.1: Deneysel çalışmada kullanılan killi zeminin geoteknik özellikleri

Parametreler	Birim	Değerler
Kum (<0.75 mm)	%	2
Silt+Kil (0.75-0.002 mm)	%	98
Likit limit (LL)	-	49
Plastik limit (PL)	-	26
Plastik indisi (PI)	-	23
Zemin grup sembolü (USCS)	-	CL
Doğal birim hacim ağırlığı (γ_n)	kN/m ³	19.3
Tane birim hacim ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26.7
Optimum su muhtevası (w_{op})	%	20.5
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{dmax})	kN/m ³	16.6
Basınç dayanımı (q_u)	MPa	0.233
Dolaylı çekme dayanımı (σ_v)	MPa	0.034

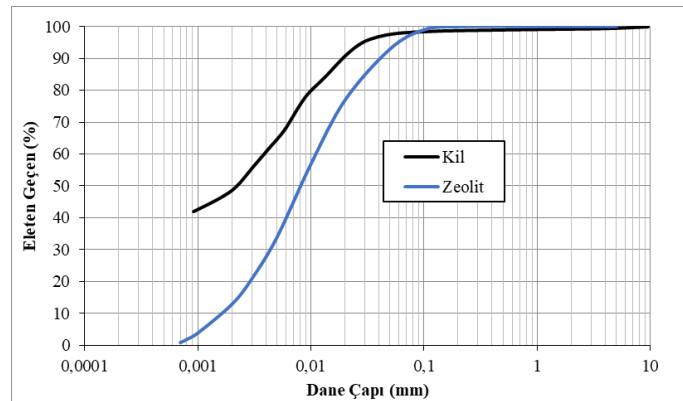
4.1.3 Zeolit

Zeolit, doğal olarak oluşan bir mineraldir ve genellikle katalizörler ve filtreleme malzemeleri gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Ancak, son yıllarda inşaat sektöründe de zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Zeolit, yüksek yüzey alanına ve gözenekli bir yapıya sahiptir, bu nedenle su ve diğer maddeleri emebilir ve depolayabilir.

Bu araştırmada kullanılan öğütülmüş ve 50 µm'den ince, en az %85 saflıkta doğal volkanik zeolit (Z) Manisa Gördes Rota Madencilik A.Ş. fabrikasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan zeolit genel görünümü Şekil 4.2a'da ve SEM görünümü Şekil 4.2b'da, hidrometre testi sonuçlarından elde edilen tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 4.3'te ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2: Deneysel çalışmada kullanılan zeolite ait a) genel görünüm ve b) SEM görünümü



Şekil 4.3: Düşük plastisiteli kil ve doğal zeolitin tane boyutu dağılım eğrisi

Tablo 4.2: Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

Parametre	Birim	K	PC	Z
SiO ₂	%	7.50	3.65	70.08
Al ₂ O ₃	%	13.61	5.84	11.35
CaO	%	10.09	58.35	2.43
Fe ₂ O ₃	%	1.61	2.94	1.56
MgO	%	5.71	4.17	1.33
SO ₃	%	0.64	0.62	<0.0005
Na ₂ O	%	51.71	-	0.98
K ₂ O	%	0.032	-	2.92
P ₂ O ₅	%	0.076	-	0.04
TiO ₂	%	0.026	-	0.12
LOI	%	2.68	1.06	8.43

4.1.4 Polipropilen Elyaf

Polipropilen elyaf bir petrol yan ürünüdür ve monomer propilenden dönüştürülmüştür. Düşük maliyetli, kolay bulunabilirliği ve çevresel koşullara dayanıklılığı nedeniyle sentetik elyaflardan en yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada F12 tipi polipropilen elyaf (PE) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan elyaf Polipropilen Elyaf San. ve Dış. Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Polipropilen elyaf görünümü Şekil 4.4'te ve özellikleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Çalışmada kullanılan polipropilen elyaf genel görünümü

Tablo 4.3: Deneysel çalışmada kullanılan polipropilen elyafın özellikleri

Parametreler	Birim	Değerler
Özgül Ağırlığı	-	0.91
Uzunluk	mm	12
Çap	mm	0,30
Çekme Mukavemeti	(MPa)	450-600
Elastisite Modülü	(MPa)	3500
Erime Noktası	(°C)	160

4.1.5 Karışım Suyu

Bu çalışmada numunelerin içerisindeki kullanılmış karışım suyu şebeke hattından alınmıştır.

4.2 Yöntem

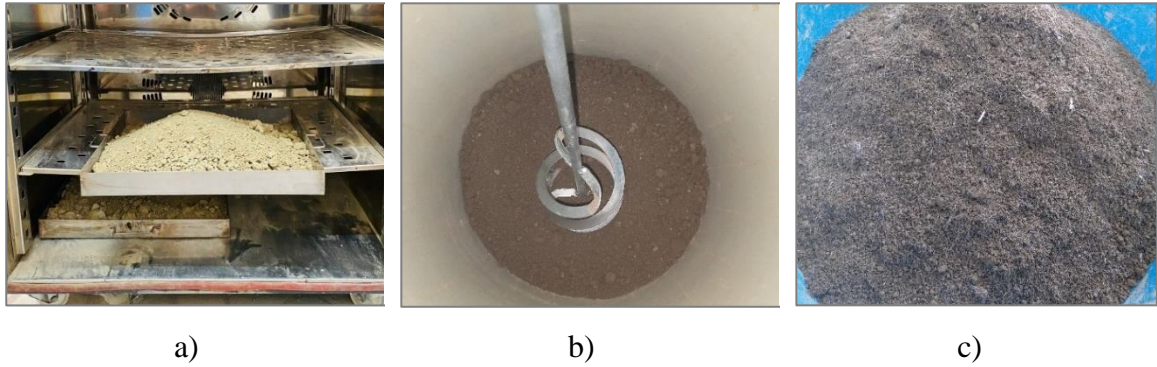
Bu bölümde çalışmada kullanılan numunelerin hazırlanması ile uygulanan deneyler ile ilgili ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yürütülmüştür. Bunun yanında doğal zemin-çimento-zeolit-polipropilen elyaf karışımlarının SEM analizleri Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarından hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Karışımların Hazırlanması

Yapılan bu çalışmada doğal zemine ağırlıkça %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarda Portland çimentosu, çimento ağırlığının %0, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında zeolit ile yer değiştirerek ve doğal zemin-Portland çimentosu-zeolit karışımlarına ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında polipropilen elyaf eklenerek toplam 105 karışım hazırlanmıştır. Karışım içerikleri detaylı olarak Tablo 4.4'te verilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{dmax}) ile optimum su muhtevası (w_{op}) belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda karışımlarda kullanılacak malzeme miktarları hesaplanarak tartılmıştır. Daha sonra zemin numunesine su ekleyerek karıştırılmış ve suyun homojen dağılmasını sağlamak için en az 4 saat boyunca bekletilmiştir. Nemli zemin numunesine polipropilen elyaf azar azar eklenerek özenle zemin numunesi içerisinde

homojen dağılmasını sağlanmıştır (Şekil 4.5). Bu şekilde karıştırılan numuneye çimento ve zeolit ilave edilerek tekrar karıştırılmış, çimento prizi başlamadan zaman kaybetmeden Standart proktor deneyi yapılmış, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{dmax}) ve optimum su muhtevaları (w_{op}) belirlenmiştir. İşi hızlandırmak ve kolaylaştırmak için, katkı madde oranları göz önüne bulundurularak ekstrem ve ortadan seçilen 25 karışım üzerine Standart proktor deneyi uygulanmış, diğer karışımların γ_{dmax} ve w_{op} değerleri katkı maddeler içerikleri ile ilişkilendirilerek regresyon yöntemiyle belirlenmiştir.

Deneysel çalışmaları için kullanılmak üzere, yukarıda tarif edilen gibi oranlarda katı malzemelere belirlenen optimum su muhtevalarını sağlayan su miktarı eklenip karıştırılarak yapay zemin karışımları hazırlanmıştır.



Şekil 4.5: Çalışmada karışım hazırlanması a) zemin numunesinin kurtulması, b) katkıların eklenmesi ve karıştırılması, c) hazırlanmış karışım görünümü

Tablo 4.4: Deneyde kullanılan karışımların deneysel programı

Karışım No.	K (%)	PC + Z (%)	PC (%)	Z (%)	PE (%)	Karışım No.	K (%)	PC + Z (%)	PC (%)	Z (%)	PE (%)
1	100	0	0	0	0	14	96.75	2.5	2	0.5	0.75
2	99.75	0	0	0	0.25	15	96.5	2.5	2	0.5	1
3	99.5	0	0	0	0.5	16	97.5	2.5	1.5	1	0
4	99.25	0	0	0	0.75	17	97.25	2.5	1.5	1	0.25
5	90	0	0	0	1	18	97	2.5	1.5	1	0.5
6	97.5	2.5	2.5	0	0	19	96.75	2.5	1.5	1	0.75
7	97.25	2.5	2.5	0	0.25	20	96.5	2.5	1.5	1	1
8	97	2.5	2.5	0	0.5	21	97.5	2.5	1	1.5	0
9	96.75	2.5	2.5	0	0.75	22	97.25	2.5	1	1.5	0.25
10	96.5	2.5	2.5	0	1	23	97	2.5	1	1.5	0.5
11	97.5	2.5	2	0.5	0	24	96.75	2.5	1	1.5	0.75
12	97.25	2.5	2	0.5	0.25	25	96.5	2.5	1	1.5	1
13	97	2.5	2	0.5	0.5	26	97.5	2.5	0.5	2	0

Tablo 4.4: (devam ediyor)

Karışım No.	K (%)	PC + Z (%)	PC (%)	Z (%)	PE (%)	Karışım No.	K (%)	PC + Z (%)	PC (%)	Z (%)	PE (%)
27	97.25	2.5	0.5	2	0.25	67	92.25	7.5	4.5	3	0.25
28	97	2.5	0.5	2	0.5	68	92	7.5	4.5	3	0.5
29	96.75	2.5	0.5	2	0.75	69	91.75	7.5	4.5	3	0.75
30	96.5	2.5	0.5	2	1	70	91.5	7.5	4.5	3	1
31	95	5	5	0	0	71	92.5	7.5	3	4.5	0
32	94.75	5	5	0	0.25	72	92.25	7.5	3	4.5	0.25
33	94.5	5	5	0	0.5	73	92	7.5	3	4.5	0.5
34	94.25	5	5	0	0.75	74	91.75	7.5	3	4.5	0.75
35	94	5	5	0	1	75	91.5	7.5	3	4.5	1
36	95	5	4	1	0	76	92.5	7.5	1.5	6	0
37	94.75	5	4	1	0.25	77	92.25	7.5	1.5	6	0.25
38	94.5	5	4	1	0.5	78	92	7.5	1.5	6	0.5
39	94.25	5	4	1	0.75	79	91.75	7.5	1.5	6	0.75
40	94	5	4	1	1	80	91.5	7.5	1.5	6	1
41	95	5	3	2	0	81	90	10	10	0	0
42	94.75	5	3	2	0.25	82	89.75	10	10	0	0.25
43	94.5	5	3	2	0.5	83	89.5	10	10	0	0.5
44	94.25	5	3	2	0.75	84	89.25	10	10	0	0.75
45	94	5	3	2	1	85	89	10	10	0	1
46	95	5	2	3	0	86	90	10	8	2	0
47	94.75	5	2	3	0.25	87	89.75	10	8	2	0.25
48	94.5	5	2	3	0.5	88	89.5	10	8	2	0.5
49	94.25	5	2	3	0.75	89	89.25	10	8	2	0.75
50	94	5	2	3	1	90	89	10	8	2	1
51	95	5	1	4	0	91	90	10	6	4	0
52	94.75	5	1	4	0.25	92	89.75	10	6	4	0.25
53	94.5	5	1	4	0.5	93	89.5	10	6	4	0.5
54	94.25	5	1	4	0.75	94	89.25	10	6	4	0.75
55	94	5	1	4	1	95	89	10	6	4	1
56	92.5	7.5	7.5	0	0	96	90	10	4	6	0
57	92.25	7.5	7.5	0	0.25	97	89.75	10	4	6	0.25
58	92	7.5	7.5	0	0.5	98	89.5	10	4	6	0.5
59	91.75	7.5	7.5	0	0.75	99	89.25	10	4	6	0.75
60	91.5	7.5	7.5	0	1	100	89	10	4	6	1
61	92.5	7.5	6	1.5	0	101	90	10	2	8	0
62	92.25	7.5	6	1.5	0.25	102	89.75	10	2	8	0.25
63	92	7.5	6	1.5	0.5	103	89.5	10	2	8	0.5
64	91.75	7.5	6	1.5	0.75	104	89.25	10	2	8	0.75
65	91.5	7.5	6	1.5	1	105	89	10	2	8	1
66	92.5	7.5	4.5	3	0						

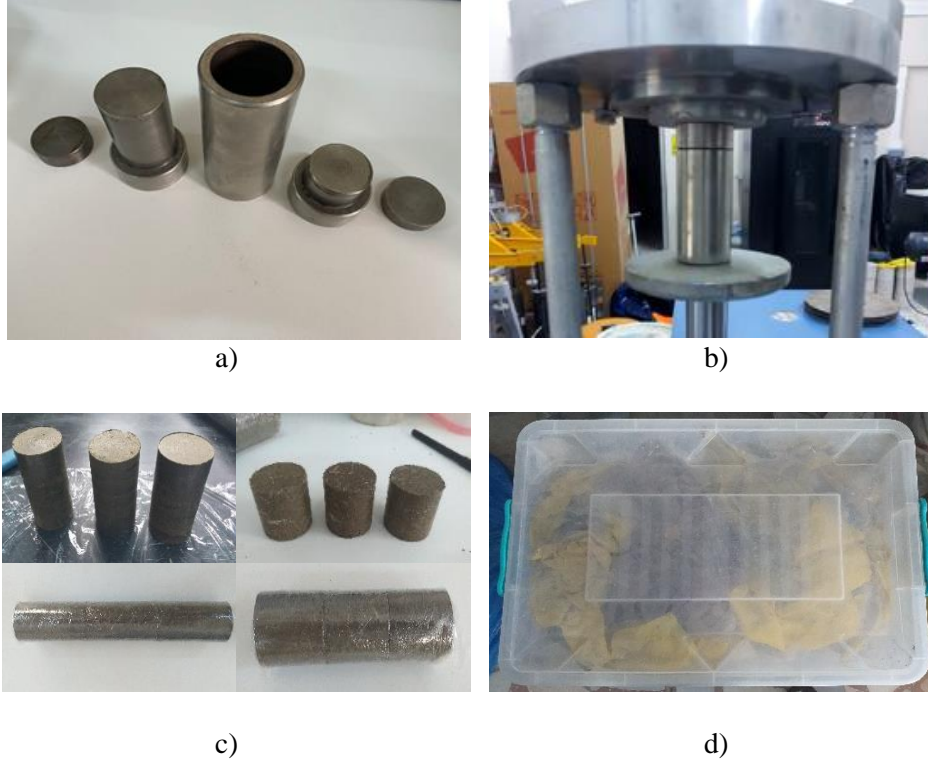
4.2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Edilmesi

Bu aşamada, karışımların belirlenen maksimum kuru birim ağırlıklarda özel metal kalıplarda sıkıştırılarak serbest basınç ve dolaylı çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi yukarıda tarif edildiği gibi karışım numuneleri hazırlanmış. Karıştırma işlemi esnasında olası su kayıplarını kontrol etmek amacıyla, çimento ve zeolit ekmeden önce karışımları tekrar tartılmış ve azalan su miktarları tamamlanmıştır. Optimum su muhtevasında homojen hale getirilen karışım numuneleri çimento prizi başlamadan deney numunelerinin sıkıştırılmasına geçilmiştir. Daha önce hesaplanan deney numunelerin kütleleri kadar malzeme tartılmış ve hidrolik pres yardımıyla kalıplara sıkıştırılmıştır (Şekil 4.6). Sıkıştırılan numuneler hidrolik pres yardımıyla çıkarılmış ve tartılmıştır. Numunelerin ağırlıkları, terazi ile 0.01g ve çap, yükseklik değerleri kumpas ile 0.02mm hassasiyetle ölçülmüştür. Daha sonra çimento içermeyen numuneler hemen deneylere tabi tutulmuş, çimento içeren numuneler nem kaybını önlemek için streç filme sarılmış ve plastik torbalara muhafaza edilerek oda sıcaklığında nemli ortamda kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 4.6d).

Hazırlanan deney numuneleri 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda numuneler üzerinde serbest basınç ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Aynı koşullarda ve oranlarda CEM-I 42,5R Portland çimentosu kullanılarak referans numuneleri de hazırlanmıştır. Elde edilen deney sonuçları referans numunelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu aşamada ek olarak üretilen numunelerden seçilen serilerde hidrasyon ürünlerini gözlemlemek, zemin-bağlayıcı arayüz fazlarını incelemek ve matris fazının boşluk yapısı üzerine incelemeler yapmak amacıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülemesi yapılmıştır. Analizler sonucunda katkı malzeme cinsine ve oranlarına bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme davranışı ile dayanımdaki gelişme ayrıntı olarak incelenmiştir.

4.2.3 Piknometre Deneyi

Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin tane birim hacim ağırlığı tespit edilmesi için piknometre deney TS 1900-1 standardına göre uygulanmıştır. Karıştırma işlemi yukarıda tarif edildiği gibi karışım numunelerinden numune alınarak su içeriğinin ölçümüne etki etmeyecek şekilde 24 saat ortalama 105°C sıcaklıkta etüvde işlem uygulanarak sağlanmıştır.



Şekil 4.6: a) Çalışmada kullanılan deney kalıpları, b) numune sıkıştırılması, c) deney numuneleri ve d) kür ortamı

Çalışmada yoğunluk şişesi (piknometre) yarısına kadar suyla doldurulmuş, vakum pompası yardımıyla havası alınmış ardından hava kabarcıkları oluşmayacak şekilde su tamamlanarak tartılmıştır. Piknometre yarısına kadar boşaltılmış, daha önce kurutulmuş numuneden 10g kadar tartılarak, tane kaybına izin verilmeyecek şekilde piknometreye aktarılmıştır. Hava kabarcığı kalmayana kadar vakum pompasıyla havası alınmış, su tamamlanarak tartılmış ve tane birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Deney iki sefer tekrar edilmiş ve ortalama değerleri alınmıştır. Piknometre deney aşamaları Şekil 4.7’de verilmiştir.

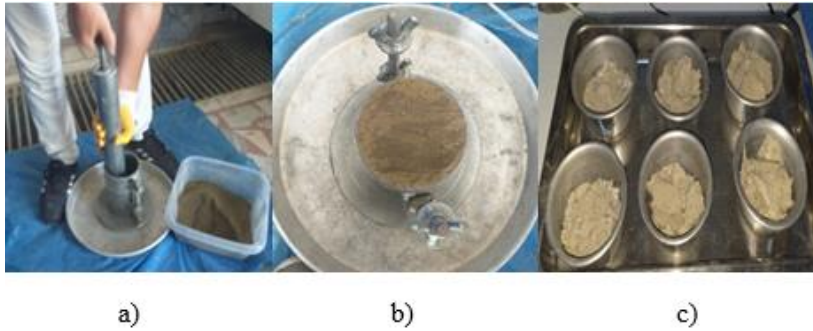


Şekil 4.7: Piknometre deney aşamaları

4.2.4 Standart Proktor Deneyi

Standart proktor deneyi, zeminin özelliklerini karakterize etmek ve mühendislik projelerinde kullanılmak üzere zeminin optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Bu deney, zeminin mukavemeti, taşıma kapasitesi, yer değiştirmesi ve stabilitesi gibi önemli özelliklerini belirlemek için temel bir araçtır.

Çalışmada maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları elde etmek için TS 1900-1 standardına uygun olarak Standart proktor deney yapılmıştır. Tablo 4.4'teki karışım deney programı takip edilerek hazırlanan numuneler 24 saat etüvde kurutulmuştur. Daha sonra belirli bir su içeriği seviyesi seçilerek, numuneler Standart proktor kalıbı içine yerleştirilmiş ve üç tabaka halinde 25'er adet standart vuruş uygulayarak sıkıştırılmıştır (Şekil 4.8a). Sıkıştırılan numunelerin üst yüzeyleri tıraşlanarak düzeltilmiş (Şekil 4.8b) ve kalıp ile ağırlığı tartılmıştır. Su içeriği belirlenmesi için alt ve üst tarafından numune alınarak 24 saat etüvde kurutulmuş (Şekil 4.8c), su muhtevaları belirlenmiş ve ortalama değerleri hesaplanmıştır. Bu işlem 5 farklı su muhtevasında tekrar edilmiştir. Su muhtevası değeri kullanılarak kuru birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Kuru birim hacim ağırlık ile ortalama su muhtevaları arasındaki ilişki grafikler üzerinden çizilerek eğrilerden maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları elde edilmiştir.

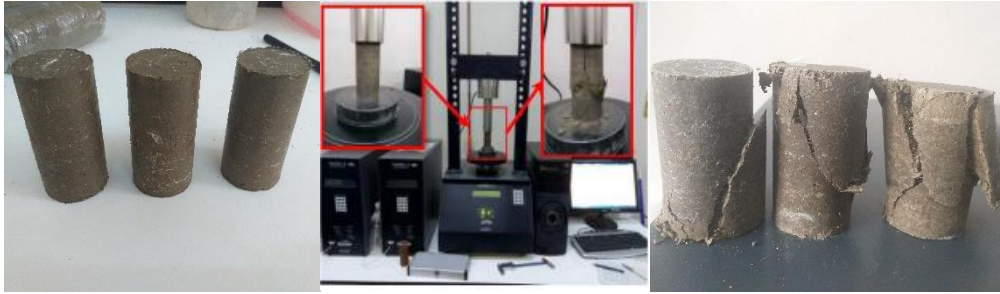


Şekil 4.8: Standart proktor deney aşamaları

4.2.5 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi, yanal desteğe ihtiyaç duymadan kendi kendini tutabilen kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemek için yaygın bir şekilde uygulanabilen basit ve düşük maliyetli bir deneydir.

Yapılan bu çalışmada serbest basınç deney numuneleri hazırlanmak için optimum su muhtevasında homojen hale getirilen karışım numuneleri çimento prizi başlamadan deney numunelerinin sıkıştırılmasına geçilmiştir. Önceden hesaplanan deney numunelerin kütleleri kadar malzeme tartılmış ve iç çapı 38 mm, yüksekliği 76 mm özel tasarlanmış metal kalıplara hidrolik pres yardımıyla iki tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Tabakalar arası süreksizlik oluşmasını önlemek için birinci tabaka sıkıştırdıktan sonra bir spatula yardımıyla üst yüzeyi örşelenmiş, ardından ikinci tabaka sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler hidrolik pres yardımıyla çıkarılmış ve tartılmış, nem kaybını önlemek için streç filme sarılmış ve plastik torbalara muhafaza edilerek oda sıcaklığında nemli ortamda kürlenmeye bırakılmıştır. Hazırlanan basınç deney numuneleri 3, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra tartılarak su muhtevaları kontrol edilmiş ve TS 1900-1 standardına göre deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.9). Serbest basınç deneyleri bilgisayar kontrollü GEOCOMP marka serbest basınç deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında eksenel yük %1/dk sabit bir gerinim hızında uygulanmıştır. Deneyler her karışım ve kür süresi için 3'er numune üzerinde yapılmış ve değerlendirmelerde ortalama değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.9: Serbest basınç dayanım deneyi uygulanması

4.2.6 Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı çekme deneyi, çeşitli yapı malzemelerinin mukavemet özelliklerini belirlemek için kullanılan bir deney yöntemidir. Bu deney yöntemi, malzemenin çekme, basınç veya bükülme gibi gerilim tiplerine maruz kalmasını simüle eder. Dolaylı çekme dayanım deneyi 1960'lardan beri esnek üstyapıları için yapısal araştırmalarında ve daha az ölçüde sıcak asfalt karışım tasarımı araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada doğal zemin-çimento-zeolit ve polipropilen elyaf numuneleri karışımlarının tek eksenli çekme dayanımlarının dolaylı yoldan belirlenmesi için dolaylı çekme deneyi

yapılmıştır. Dolaylı çekme deney numune çapı 38 mm ve yüksekliği 38 mm'lik silindirik bir kalıba tek seferde sıkıştırılarak hazırlanmış. Numuneler 3, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra dolaylı çekme dayanımları elde etmek için TS 7654 standardına uygun olarak dolaylı çekme deneyleri uygulanmıştır. Deneyleri Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Zemin Mekaniği Laboratuvarındaki bilgisayar kontrollü GEOCOMP marka serbest basınç dayanım cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.10). Deney sırasında eksenel yük, %2/dk sabit bir gerinim hızında yatay olarak numune kopana kadar sürekli olarak uygulanmıştır. Dolaylı çekme dayanımı elde etmek için Gokhale (1960) tarafından verilen aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

Burada; σ_t (kN/m²) numunenin dolaylı çekme dayanımı, P (N) numunenin göçme yükü, D (mm) numunenin çapı ve L (mm) numunenin boyunu ifade etmektedir.

Deneyler her karışım ve kür süresi için 3'er numune üzerinde yapılmış ve değerlendirmelerde ortalama değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Dolaylı çekme dayanımı deneyi uygulanması

4.2.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

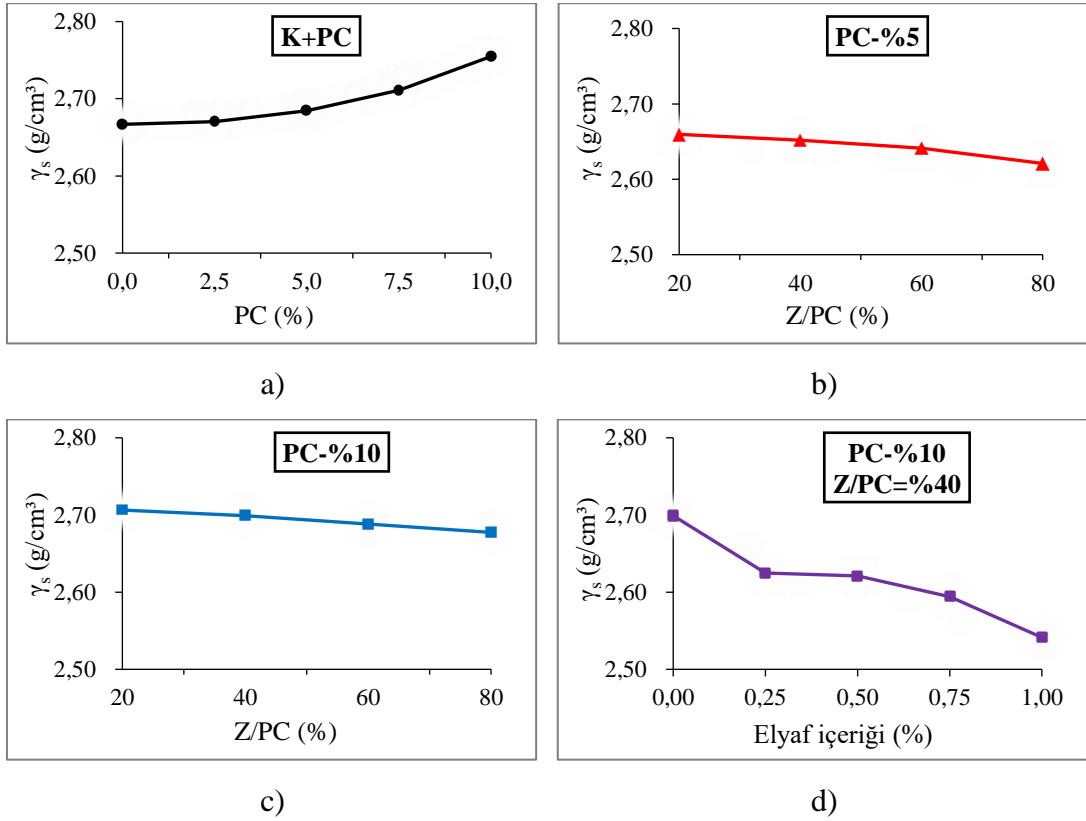
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sayesinde, numune yüzeyine odaklanmış manyetik mercekle kullanılarak hızlandırılmış elektron demetleri gönderilerek yüzeyin taranması sağlanır ve böylece görüntüler elde edilir. Elektronlar numunelerin atomları ile etkileşerek saçılır ve detektörler tarafından analiz edilerek, numuneler nano ve mikro düzeyde görüntülenebilir.

Bu alışmada Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda TESCAN marka MAIA3XMU model cihaz kullanılarak SEM analizleri yapılmıştır. Analiz için 28 gün kürlenmiş serbest basınç deneyi numuneleri kullanılmıştır, etüvde 24 saat kurutulduktan sonra nem almayacak şekilde poşetlenerek SEM analiz birimine teslim edilmiştir. Tüm numuneler 2 farklı noktadan büyütme oranları ile incelenmiştir.

5. BULGULAR

5.1 Piknometre Deney Sonuçları

İncelenen doğal kil-çimento-zeolit-polipropilen elyaf karışımları üzerinde yapılan piknometre deney sonuçlarından elde edilen tane birim hacim ağırlığı (γ_s) sonuçlarını Şekil 5.1'de göstermektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi doğal zemine çimento ilavesi ile malzemelerinin tane birim hacim ağırlığını arttırmaktadır. Doğal zemin-çimento karışıma zeolitinin dahil edilmesinde tane birim hacim ağırlığı kademli olarak azaldı. Ancak karışımlara polipropilen elyaflar katılmasıyla elde edilen numunelerinin piknometre deney sonuçlarına bakıldığı zaman polipropilen elyaf yüzdesi arttıkça tane birim hacim ağırlığında doğal zemin, çimento ve zeolit karışımlara göre daha çok azaldığını görülmektedir.



Şekil 5.1: Karışım numunelerinin katkı oranlarına göre tane birim hacim ağırlığı değişimi

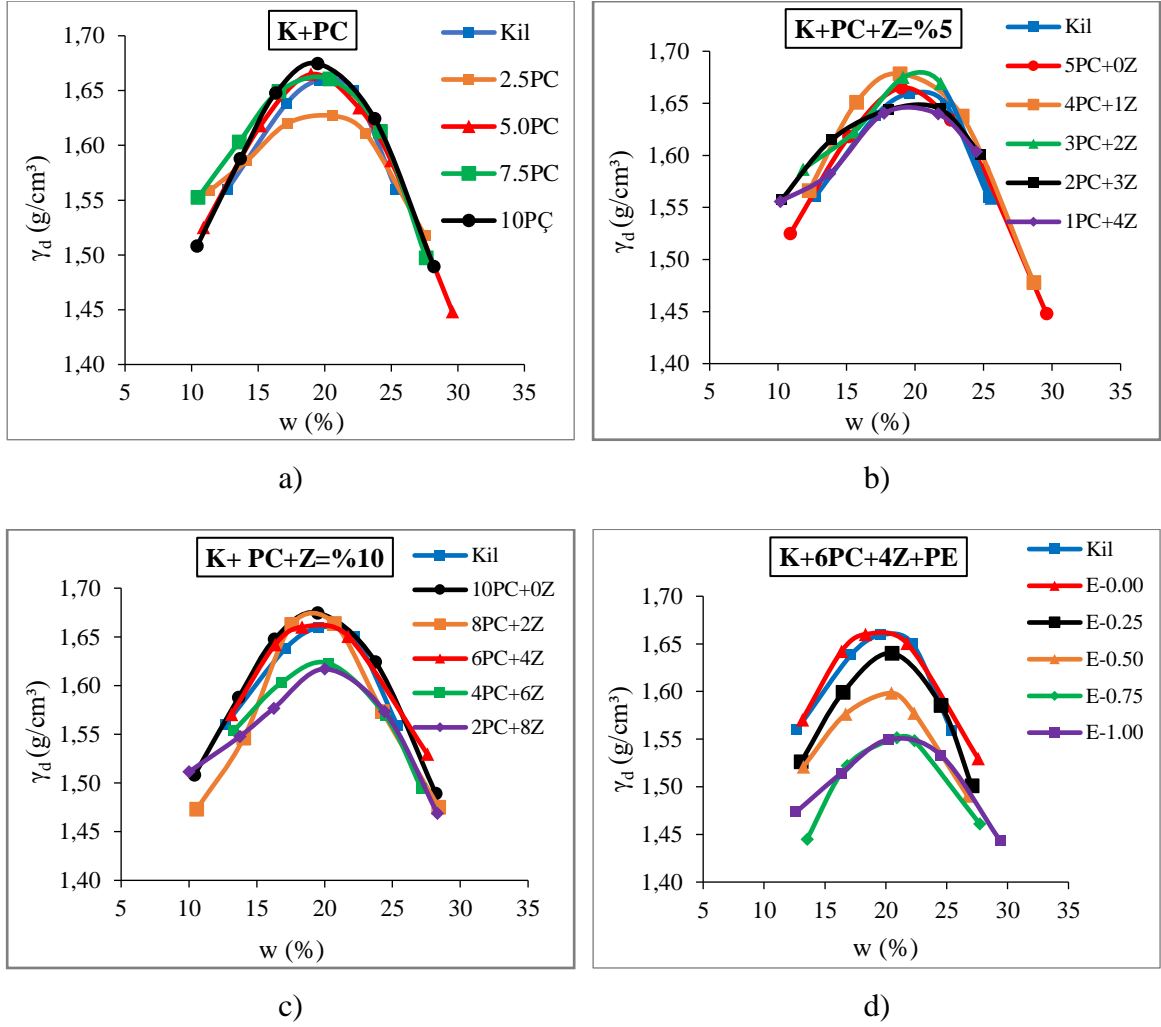
5.2 Standart Proktor Deney Sonuçları

Bu aşamada, ilk olarak doğal zemin özellikleri belirlenmek için Standart proktor deney yapılarak doğal zeminin optimum su içeriği (ω_{op}) %20.4 ve maksimum kuru birim hacim

ağırlık (γ_{dmax}) 1.66 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 5.2’de verilen grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 5.2a, incelenen kil-çimento karışımlarının Standart proktor testleri sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, karışımların çimento içeriği arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su miktarı da artmaktadır. Bu eğilim, karışımın sementasyon ve flokülasyon süreçlerine ve çimentonun daha yüksek özgül ağırlığına bağlanmaktadır (Pourakbar vd., 2015; Ronoh vd., 2014). Doğal zemine çimento içeriğinin %2.5’ten %10’a kadar eklenmesi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve su miktarında doğal zemine göre sırasıyla 0.023 g/cm³ ve %0.6 artışa neden olmuştur. Optimum su miktarındaki artış, çimentonun hidrasyonu için daha fazla suya olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır.

Çimentolu zeminde ve çimento ile zeolit yer değiştirilmesi Şekil 5.2 b ve c’den görüldüğü gibi, zeolit oranındaki artışı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde kademeli bir azalmaya neden olmuştur. Bu azalmanın sebebi, zeolitinin daha düşük özgül ağırlığına bağlı olabilir. Buna karşın, zeolit oranının artışı optimum su muhtevası değerlerinin kademeli olarak artmasına yol açmıştır. Çimentolu numunelere kıyasla zeolit içeriğinin artmasıyla optimum su muhtevalarının artması, zeolitinin çimentoya göre daha fazla su tutma potansiyeli olmasından kaynaklandığını düşünmektedir.

Polipropilen elyafın eklenmesi, doğal zemin-çimento-zeolit karışımlarındaki Standart proktor deney sonuçlarında maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki azalmaya ve optimum su muhtevalarının değerinin kademeli olarak artırılmasına neden olmuştur (Şekil 5.2d). Maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki azalmanın nedeni, polipropilen elyafların zemin partiküllerinin yerini alarak zemin yoğunluğunu düşürmesidir. Optimum su muhtevalarının artış sebebi polipropilen elyafın zemin matrisinde ağ yapısı oluşturarak su tutabilen ekstra boşlukların meydana getirmesidir.



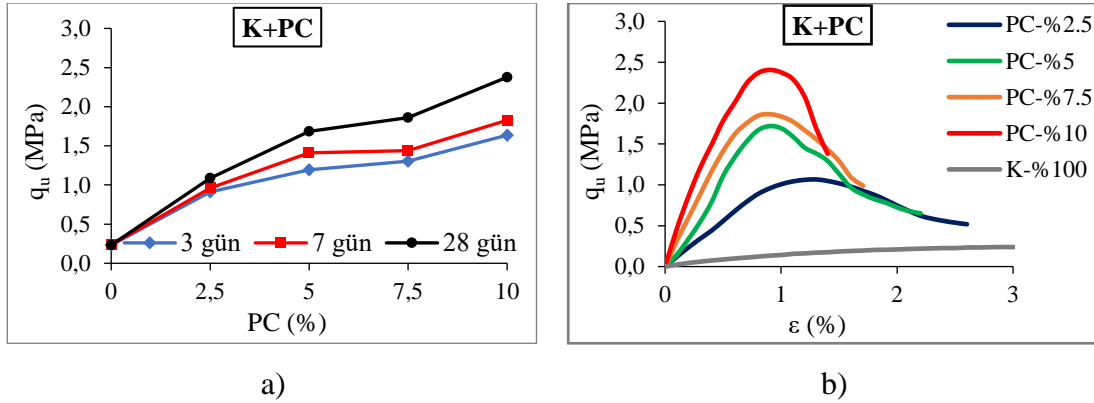
Şekil 5.2: Deneysel karışımların kompaksiyon eğrileri

5.3 Serbest Basınç Deney Sonuçları

Bu çalışmada doğal zemin numunesine kuru ağırlıkça %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarda Portland çimentosu, çimento ağırlığının %0, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında zeolit ile yer değiştirilerek ve doğal zemin-Portland çimentosu-zeolit karışımlarına ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında polipropilen elyafı eklenerek optimum su içeriği ve standart enerji ile sıkıştırılmış zemin karışımı deney numuneleri 3, 7 ve 28 gün kürlendikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur, deney sonuçları aşağıdaki bölümlerde gösterilmiştir.

Yumuşak killi zeminler, doğal olarak çökmeye ve deforme olmaya yatkın olduklarından, yapılarda ciddi problemlere neden olabilirler. Bu nedenle, zeminin dayanıklılığını artırmak için çimento ilavesi yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada, Bartın killi zeminlerine Portland

çimento ilavesi ile serbest basınç dayanım değeri artırılmış ve kür süresinin artmasıyla da bu değer arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.3a). Doğal zemin serbest basınç dayanımı 0.233 MPa iken 3 ve 28 günlük %10 çimento içeren karışımın sırasıyla 1.64 ile 2.38 MPa değerlerine ulaşmıştır. Bununla birlikte çimento oranı artmasıyla numunelerin sünekliğinin azaldığı görülmektedir. Şekil 5.3b’de 28 günlük farklı çimento içerikli numunelerin eksenel gerilme eğrileri göstermiştir.

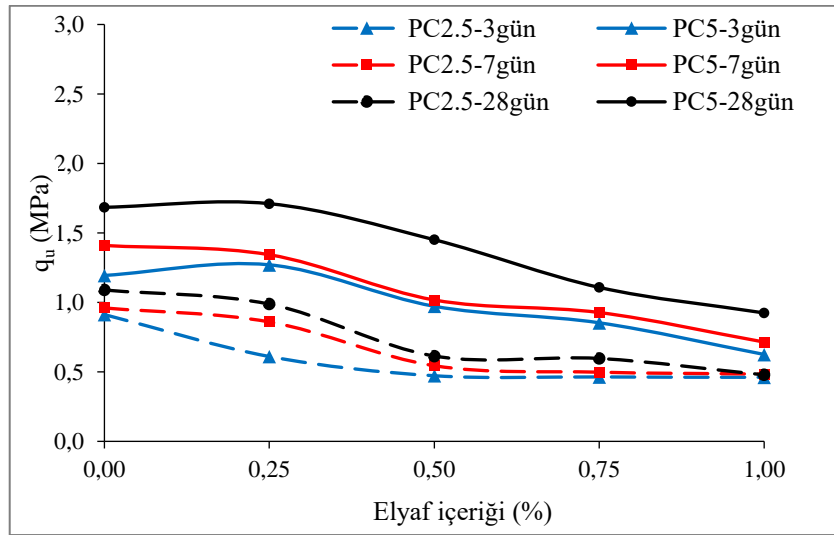


Şekil 5.3: a) Çimento içeren numunelerinin kür süresi ile serbest basınç dayanımının değişimi, b) 28 günlük yenilme mekanizmaları

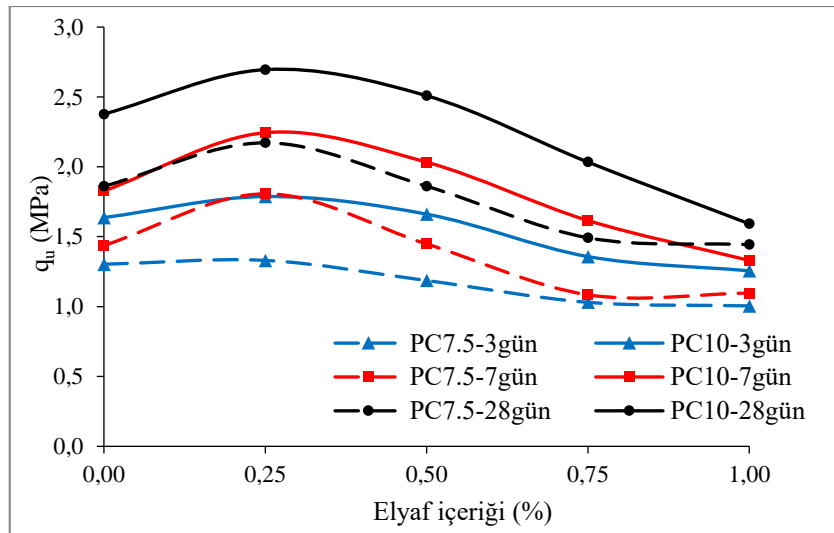
Şekil 5.4’te çalışmada Portland çimentosu ile stabilize edilmiş Bartın killi zeminlerine polipropilen elyaf takviyesinin etkisini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm karışımların serbest basınç dayanımı artan kür süresi ile artış göstermiştir. Bununla birlikte, %10 çimento içerikli karışımların %2.5, %5 ve %7.5 içerikli çimento karışımlarından daha iyi performans gösterdiği açıkça görülmektedir. Polipropilen elyaf içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, en iyi performans %0.25 elyaf içerikli karışımlar göstermiştir. 28 günlük %10 çimento içeren karışımın serbest basınç dayanımı 2.34 MPa iken, %0.25 elyaf ilavesiyle %13 artarak 2.64 MPa’ya yükselmiştir. Aynı karışıma %1 elyaf katıldığında ise elyafsız karışımlarla kıyaslandığında bu değer %34 azalarak 1.54 MPa’ya düşmüştür. Bu nedenle, çimento ile stabilize edilmiş kilde %0.25 polipropilen elyaf takviyesinin serbest basınç dayanımında artışa neden olduğu açıkça görülmektedir. Ancak, polipropilen elyaf oranı %0.25 üzerine çıktığında serbest basınç dayanımı tüm karışımlarda düşüş göstermiştir. Bunun sebebi, polipropilen elyafın numunelerde kolayca dağılabilmesi ve elyaf içeriği nispeten düşük olduğunda içerideki çekme gerilimini taşıyabilmesidir. Ancak, elyaf içeriği aşırı olduğunda, polipropilen elyaf ayrı ayrı karıştırmak zor olmuştur.

Bu nedenle aşırı elyaf katılımı numunelerin bazı kısımlarında birbirine dolanarak oradaki sementasyon ve elyaf bağlarını engellenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, polipropilen elyafın ilavesinin çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerin serbest basınç dayanımını artırdığı ve bu artışın zamanla arttığı belirlenmiştir.



a)

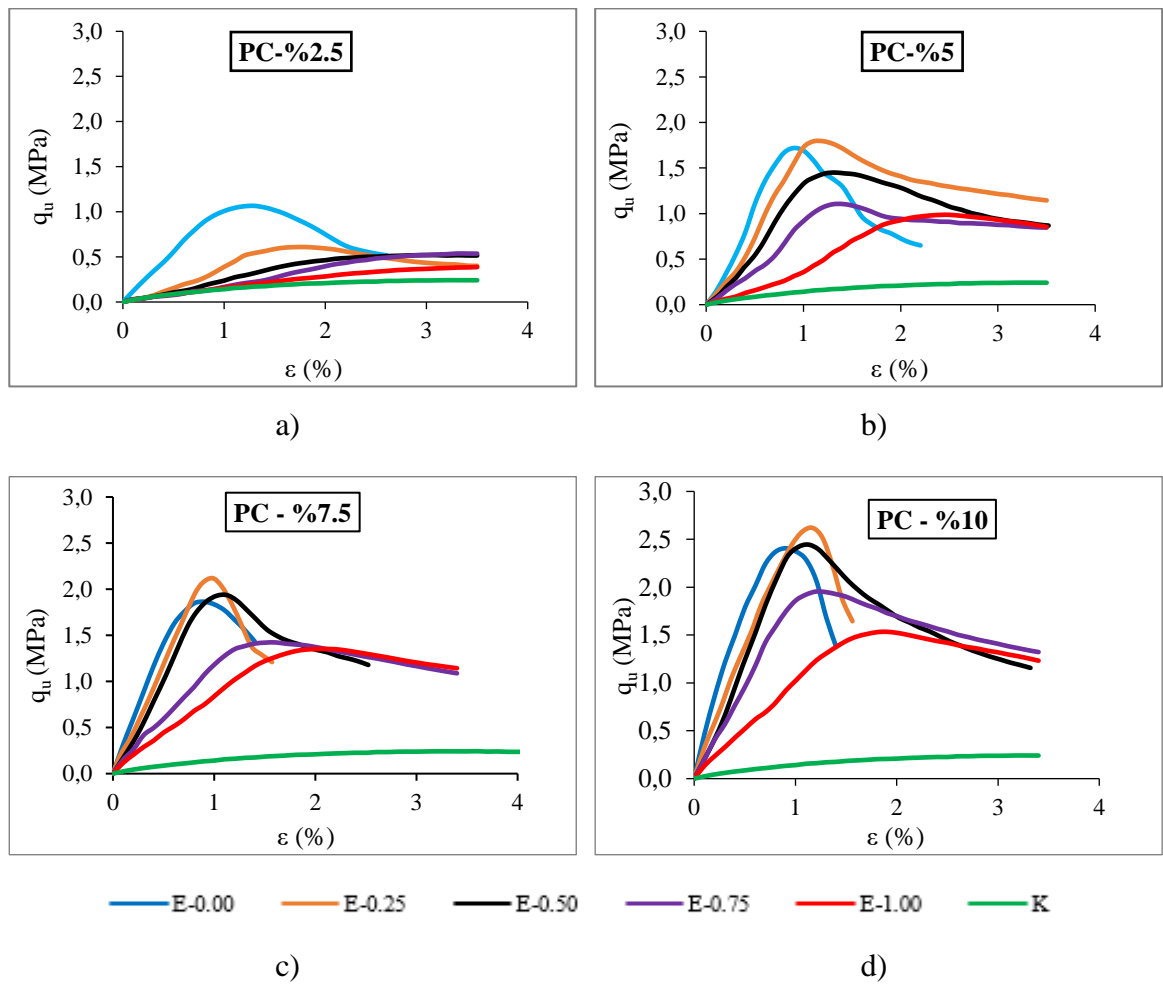


b)

Şekil 5.4: Polipropilen elyaf içeriğine bağlı Portland çimentosu katkıli karışımların serbest basınç dayanımı a) %2.5-%5 ve b) %7.5-%10 (kesik çizgiler %2.5 ve %7.5 çimentolu karışımları göstermekte)

Polipropilen elyafın çimentolu zemin üzerindeki etkisi Şekil 5.5'ten kolaylıkla fark edilebilir. Eksenel gerinim artışı ile eksenel gerilme, tepe değerine ulaşılan kadar artar,

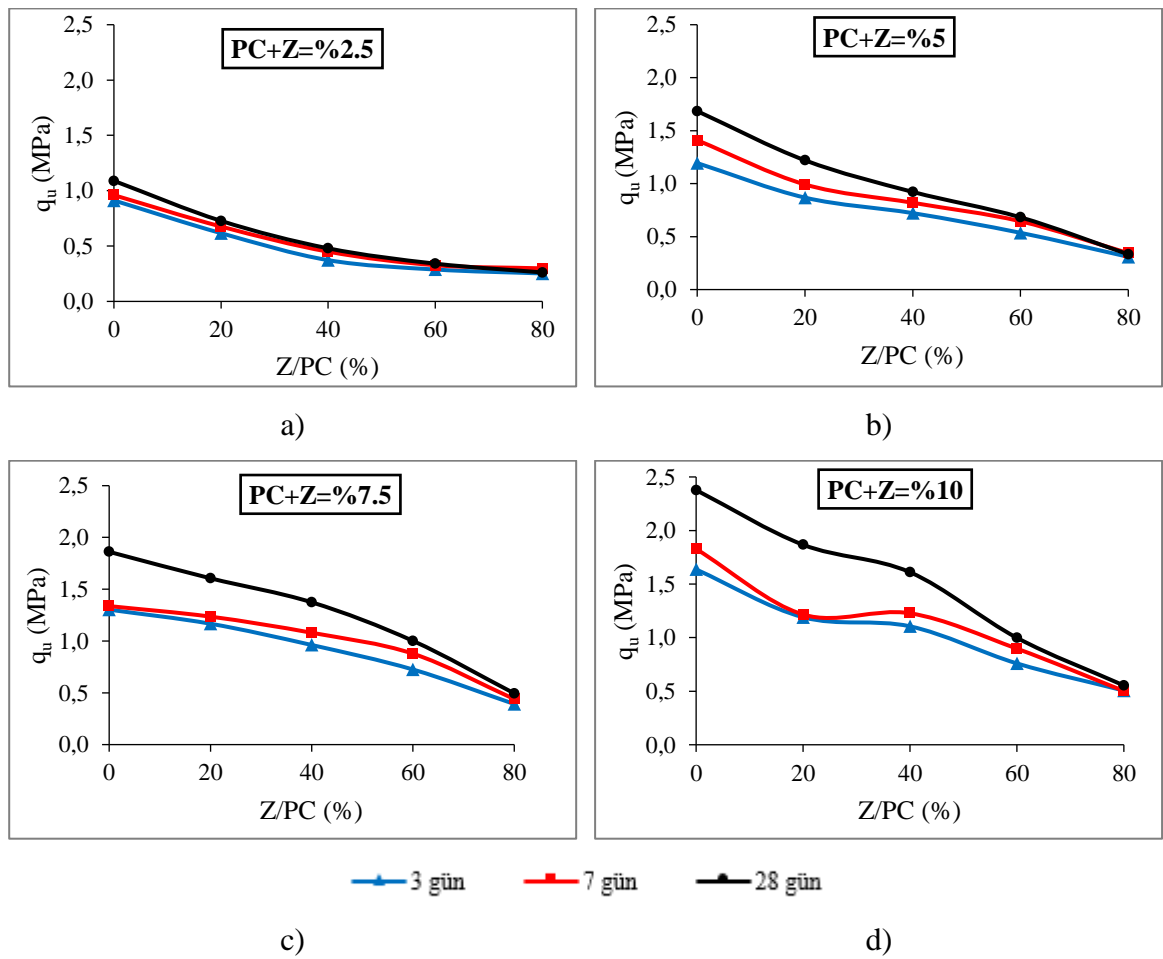
ardından çimentolu zeminde ani bir düşüş gözlenir. Benzer davranış %0.25 elyaf takviyeli karışımlar da sergilenmiştir. Ancak elyaf içeriğindeki artışı ile tepe noktası sonrası gerilmenin azalması kademli olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi polipropilen elyaf oranındaki artış basınç dayanım değerlerinin daha yüksek eksenel deformasyonlarda maksimum değerlere ulaşmasını sağlamıştır. 28 günlük %10 çimento içerikli karışımda maksimum basınç dayanımı %0.90 eksenel deformasyonda ulaşırken, elyaf içeriği %0.25 ve %1 olan karışımlarda maksimum dayanımları sırasıyla %1.09 ve %1.90 deformasyonlarda ulaşmıştır.



Şekil 5.5: 28 günlük polipropilen elyaf ve Portland çimentosu katkıli karışımlarına ait eksenel deformasyon basınç dayanımı ilişkisi

Sonuç olarak, çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli Bartın killerine %0.25 oranında polipropilen elyaf ilavesinin basınç dayanımı üzerinde olumlu etki gösterdiği, daha yüksek oranlarda elyaf takviyesinin ise sünekliğe katkı sağladığı görülmüştür.

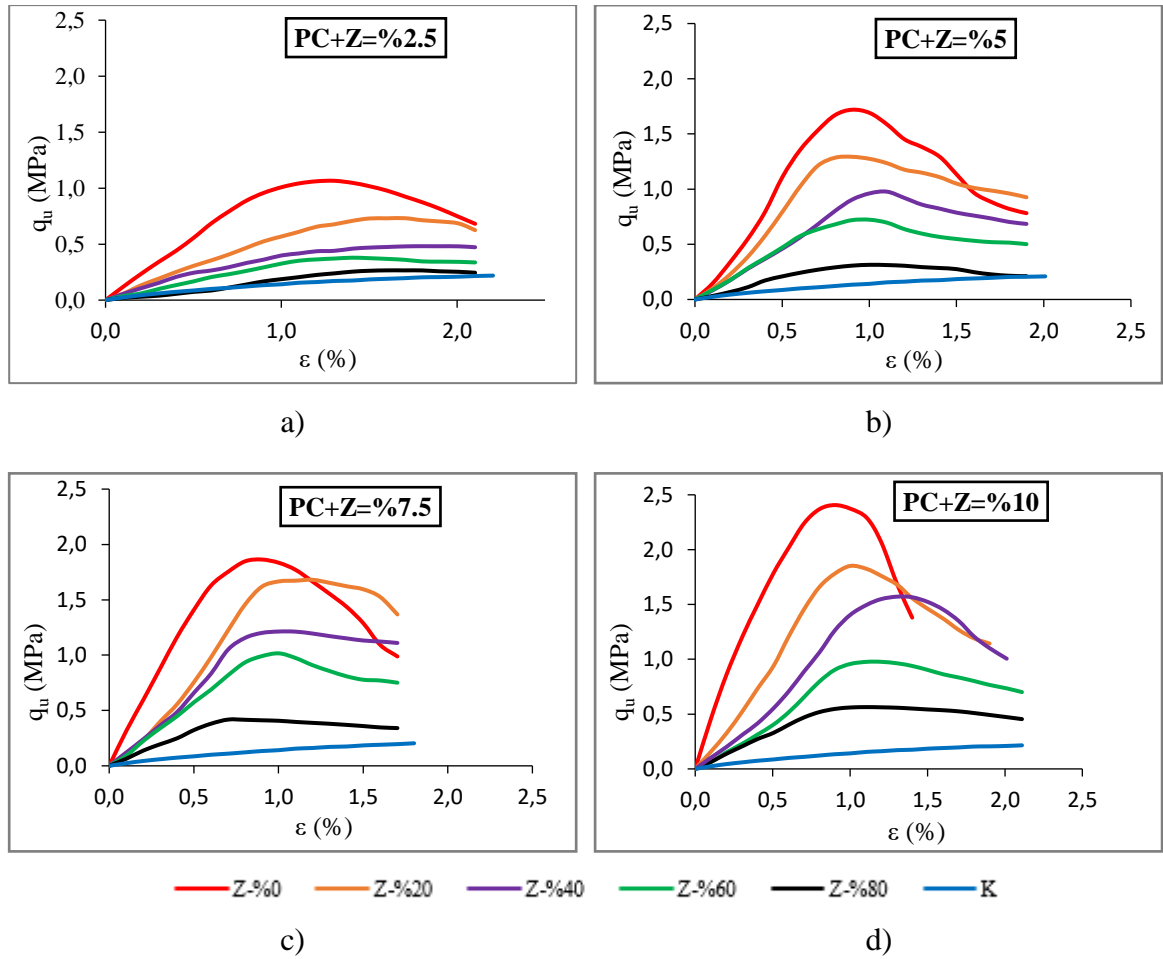
Çimento ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli kil zeminlere zeolit katkısının etkisi incelendiğinde zeolitin çimento ile yer değiştirilmesinin numunelerin serbest basınç dayanımının düşmesine neden olduğunu görülmektedir (Şekil 5.6). Zeolitin bu etkisi, zemindeki stabilizatör oranının artmasıyla birlikte daha belirgin hale geldiğini görülmektedir. Chenarboni vd., (2021) göre %15'ten fazla zeolit ilavesi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarının zeolitin puzolanik reaksiyonu sırasında tamamen tüketilmesi için yeterli olmadığından, puzolanik malzemelerin bir kısmı reaksiyona girmeden etkisiz kalabilmektedir. Bu durum, stabilize edilmiş numunelerin genel mukavemetinde bir azalmaya sebep olmaktadır.



Şekil 5.6: Zeolit ve çimento içerikleri ile serbest basınç dayanımlarının kür süresine göre değişimi

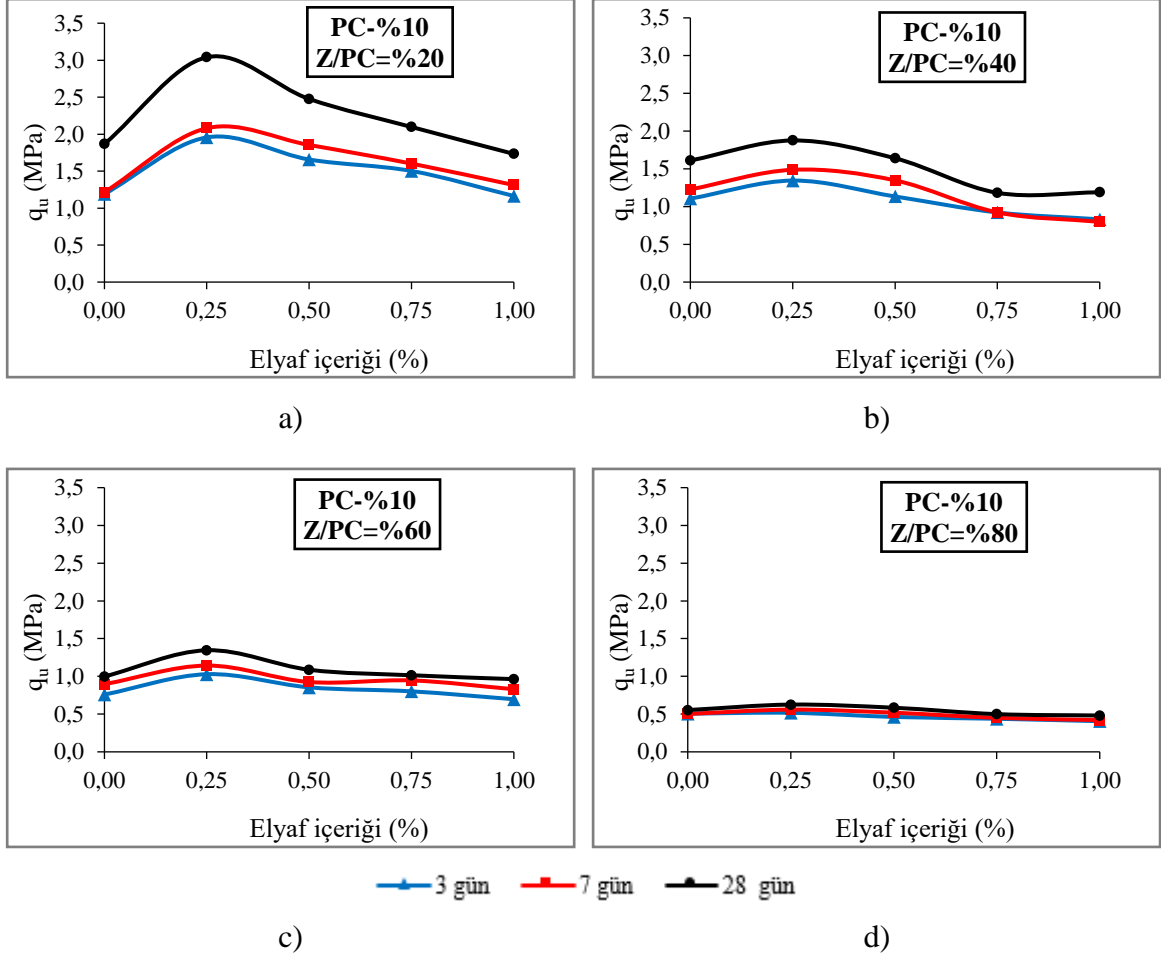
Şekil 5.7'de farklı katkılarda çimento ile zeolit yer değiştirilmesi sonucunda elde edilmiş 28 günlük numunelerin gerilme-gerinim eğrilerini göstermektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre karışım numunelerinin çimento oranı %2.5'ten %10'a çıkarken eksenel deformasyonu azalmaktadır. Ayrıca, stabilizatör içeriği %2.5 ve %10 olan karışımlarda,

çimentonun %80'e kadar zeolit ile yer değiştirilmesi, yenilme geriniminde artış olarak ifade edilen süneklik artışı gözlemlenmiştir.



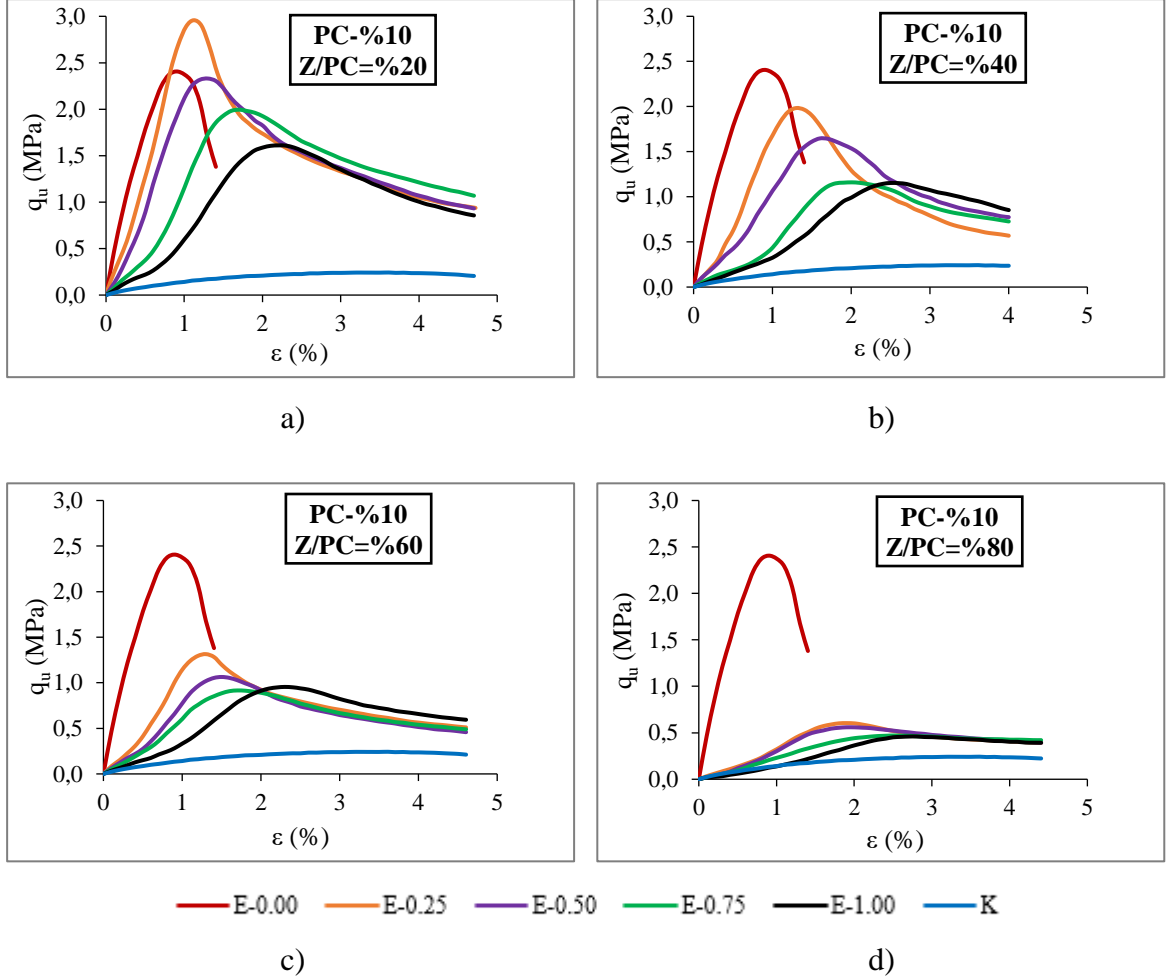
Şekil 5.7: 28 günlük çimento ve zeolit katkıli karışımlarına ait aksenal deformasyon basınç dayanımı ilişkisi

Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak kili zeminlere zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiş, deney sonuçları Ek.1'de verilmiş, ayrıca %10 çimento ve zeolit içerikli karışımlara ait deney sonuçları Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Deney sonuçları, çimento %20 zeolit ile yer değiştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesi ile elde edilen %10 katkıli karışım, diğer karışımlardan daha iyi performans sergilediği göstermiştir. 28 günlük %10 çimento içeren karışımın serbest basınç dayanımı 2.34 MPa iken, %10 çimento içeriğinde %20 zeolit ve %0.25 elyaf ilavesiyle %30 artarak 3.04 MPa'a yükselmiştir. Ancak çimento içeriğinde zeolit ve polipropilen elyaf yüzdesi arttıkça, serbest basınç dayanım değerleri düşmüştür.



Şekil 5.8: Polipropilen elyaf içeriğine bağlı zeolit ve Portland çimentosu katkıli karışımları ve kür süresinin serbest basınç dayanımı değerlerine etkisi

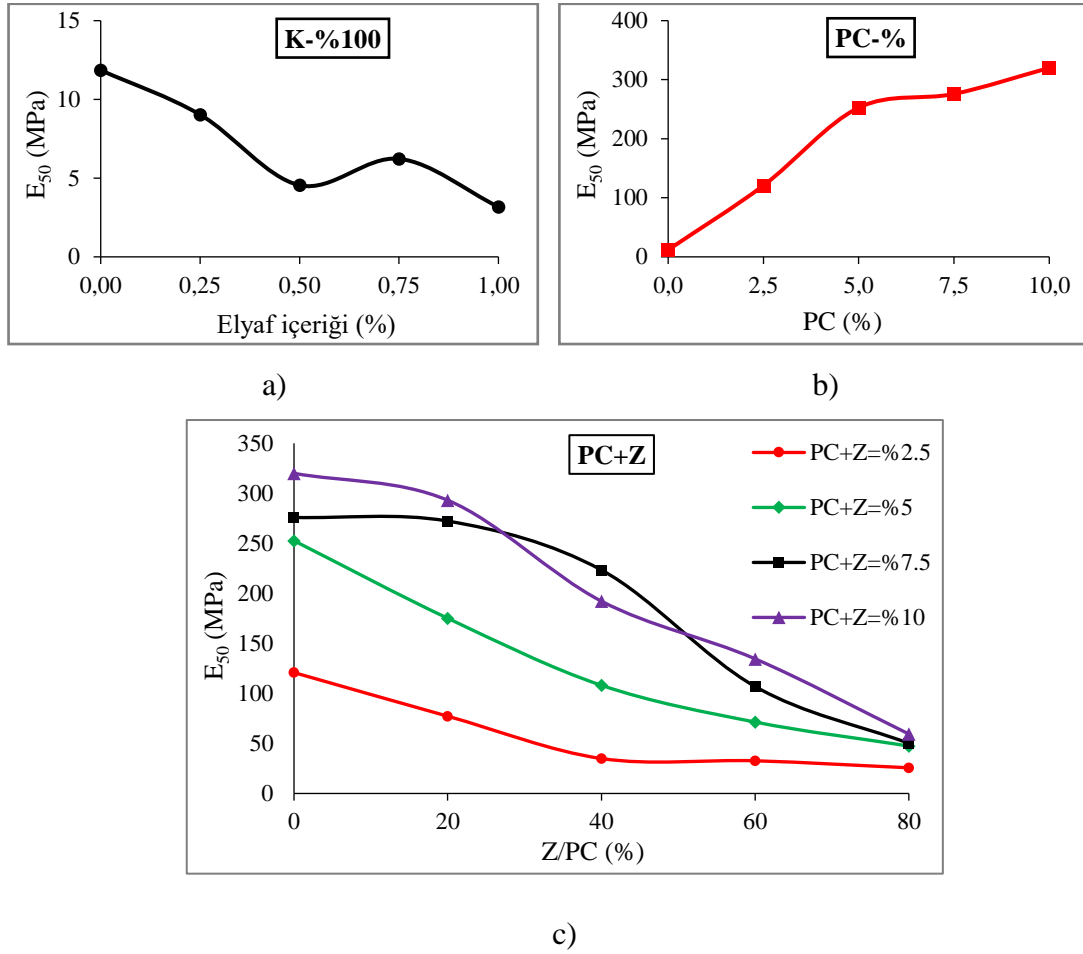
Şekil 5.9'da 28 günlük %10 çimento içeriklerinde zeolit değişiminin ve polipropilen elyaf takviyesinin etkisinin gerilime-şekil değiştirme davranışını göstermektedir. Eksenel gerinim artışı ile eksenel gerilme, tepe değerine ulaşılan kadar artar, ardından çimentolu zeminde ani bir düşüş gözlenir. Benzer şekilde %20 zeolit ve %0.25 polipropilen elyaf ilavesi karışımların mukavemetini artırmış ve aynı zamanda sünekliğine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, %10 stabilizatör içeriklerinde çimentonun %80'e kadar zeolit ile değiştirilmesi ve %0.25'ten fazla polipropilen elyaf takviyesi, serbest basınç dayanımda azalmaya ve sünekliğinin artmasına yol açmıştır.



Şekil 5.9: 28 günlük %10 çimento ve zeolit numunelerine ait polipropilen elyaf içeriğine bağlı gerilme-gerinim eğrileri

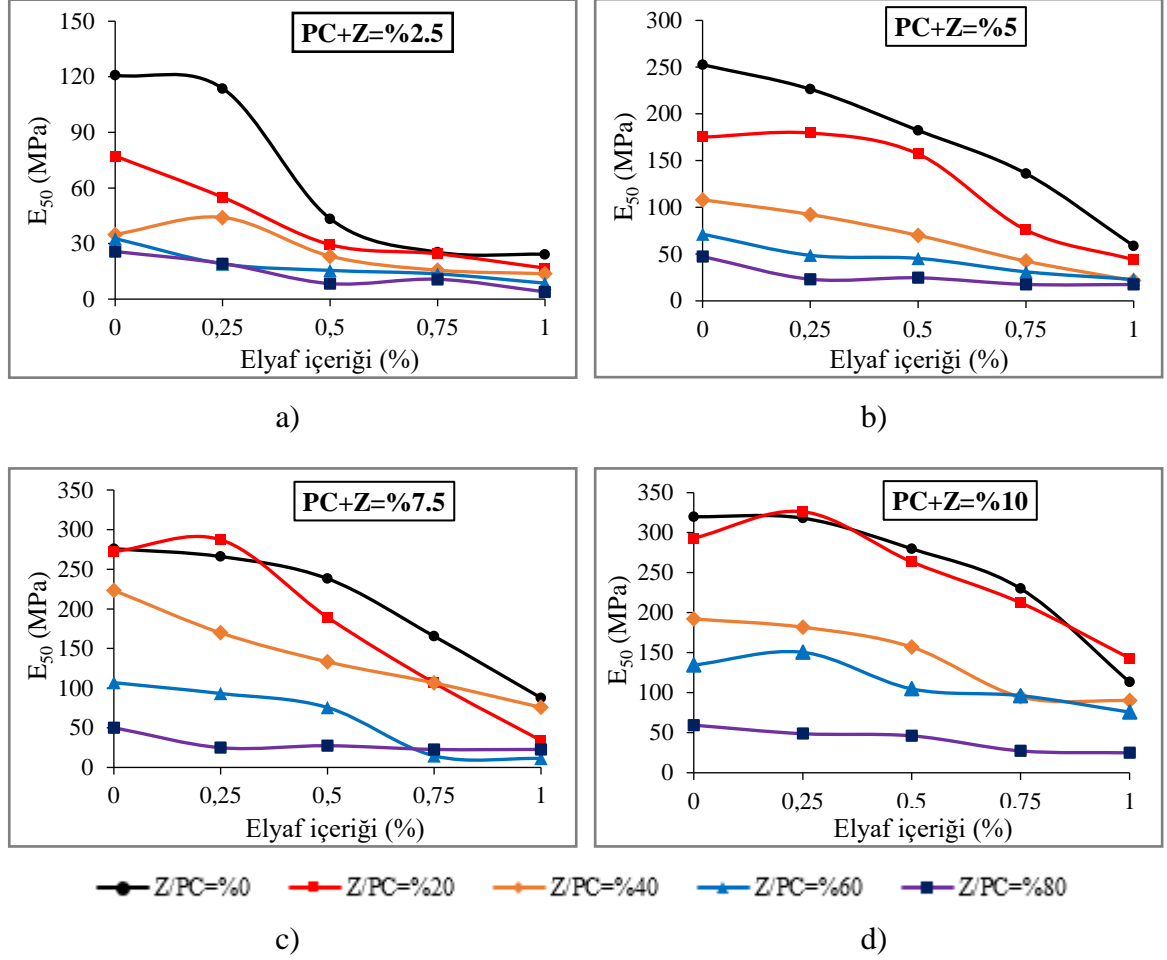
Çalışmada, çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin elastisite modülüne etkisi de araştırılmıştır. Elastisite modülü ölçümleri, numunelerin 28 gün süre bekletilmesi sonrasında gerçekleştirilmiştir. Çimento-zeolit ve polipropilen elyaf ile stabilize edilmiş numunelerin serbest basınç dayanım deneylerinin gerilme-gerinim eğrilerinden elde edilen E_{50} değerleri grafik olarak aşağıda gösterilmiştir. Doğal zemine polipropilen elyaf eklenmesi numunelerin E_{50} değerlerinin Şekil 5.10a'dan görüldüğü gibi düşmesine neden olmuştur. Ancak %0.75 polipropilen elyaf içeriğinde görülen artışın, numune hazırlanmasında oluşan bir hatadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Doğal zeminde çimento miktarının artmasıyla E_{50} değerlerinde bir artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak, çimento miktarının %5'ten fazla artırılmasıyla elastisite modülündeki yükseliş hızı yavaşlamıştır (Şekil 5.10b). Bu değişim, çimento içeriğinin artmasıyla stabilize edilmiş numunelerin daha sert hale geldiğini ve 28 günlük kürlenme süresinde hidratasyon reaksiyonundan kaynaklanan CSH jelinin oluşumuna ve artışına

atfedilebilir. Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlere zeolit ilavesi, E_{50} değerlerinde kademli olarak azalmaya yol açmıştır (Şekil 5.10c).



Şekil 5.10: Çalışmada kullanılan katkı maddelere göre elastisite modülü (E_{50}) değişimi

Çimento ve zeolit ile stabilize edilmiş Bartın killi zeminlere polipropilen elyaf takviyesinin elastisite modülüne etkisi Şekil 5.11’de sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde %7.5 ve %10 çimento içerikli karışımlarda %20 zeolit ile yer değiştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf ilavesi elastisite modülünün artışına, diğer bütün karışımlarda ise elyaf oranı artışı ile elastisite modülünün düşmesine neden olmuştur. Düşüş nedeni karışımlarda aşırı elyaf katılımı ile numunelerin bazı kısımlarında elyafın birbirine dolanarak oradaki sementasyon ve elyaf bağlarını engellemesi ve elastisite modülünün düşmesine sebep olmuştur.



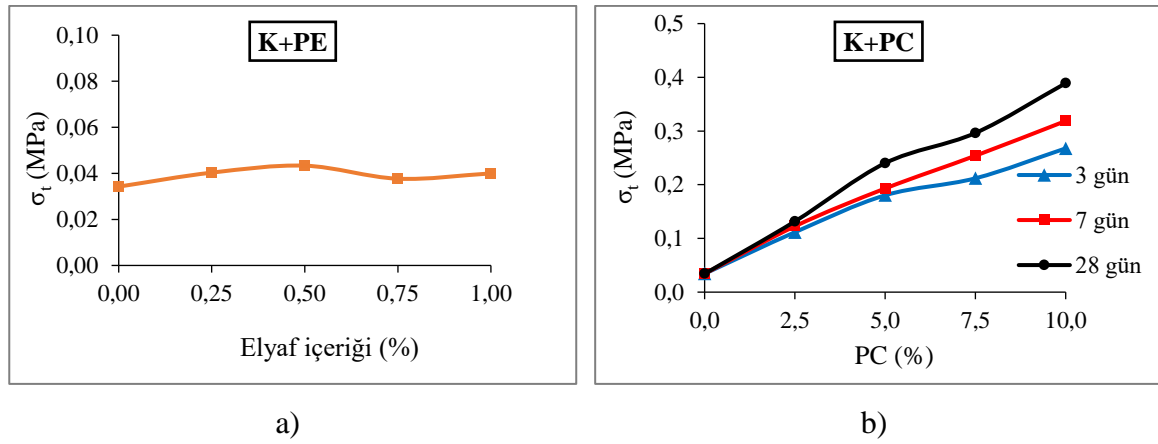
Şekil 5.11: Çalışmada kullanılan katkı maddelerinin elastisite modülü (E_{50}) elyaf yüzdesine göre değişimi

Sonuçlar çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin zeminin dayanıklılığını artırdığını ve sünekliğini elde edildiğini göstermektedir. Ancak, ilavelerin etkisi zeminin yapısına ve ilave miktarlara bağlı olarak değişebilir ve her durumda özel olarak incelenmesi gerekmektedir.

5.4 Dolaylı Çekme Deney Sonuçları

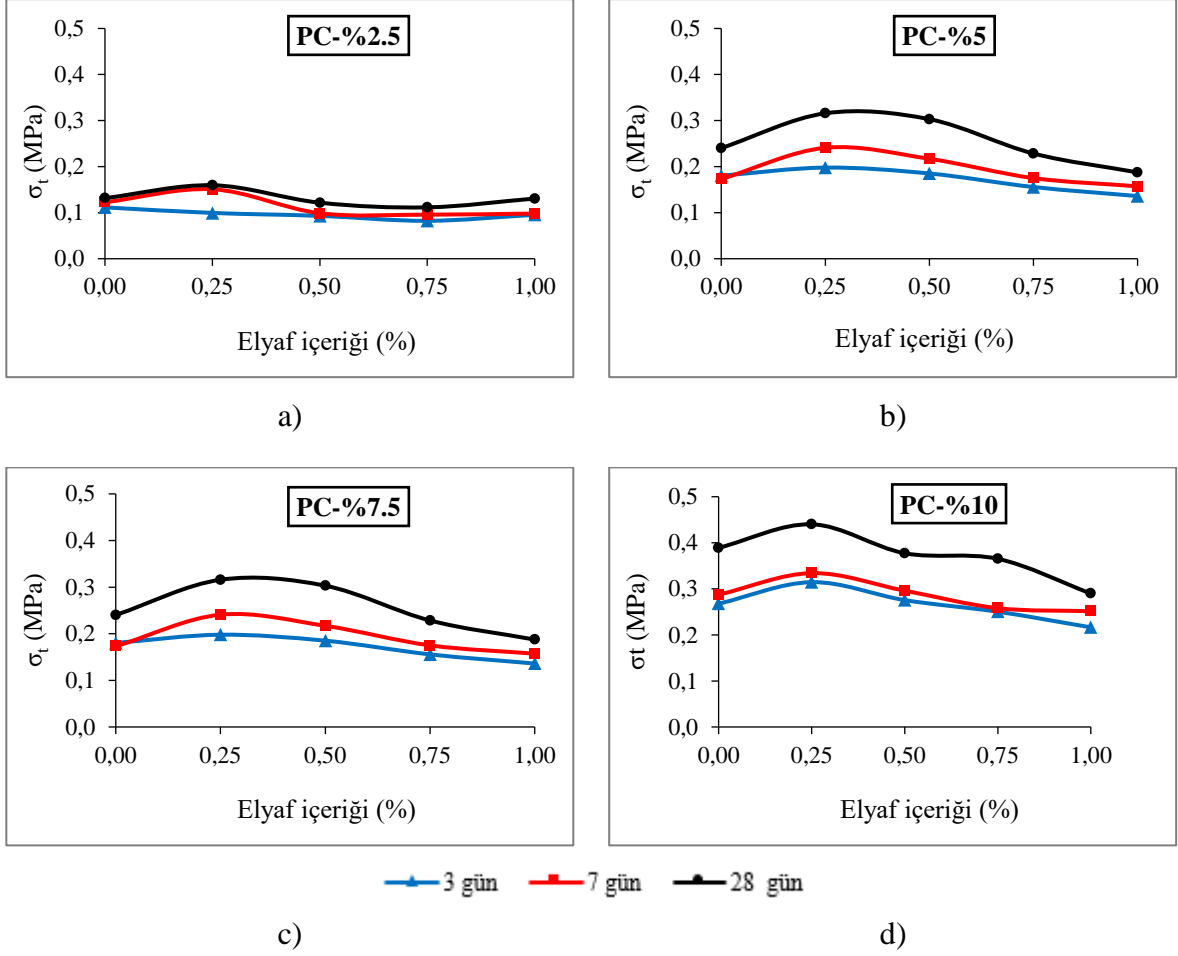
Farklı oranlarda Portland çimentosu, zeolit ve polipropilen elyaf ile güçlendirilmiş, optimum su içeriği ve standart enerji ile sıkıştırılmış zemin karışımı deney numuneleri 3, 7 ve 28 gün kürlendikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulmuştur, deney sonuçları aşağıda grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.12a'ya göre, yumuşak killi zeminlere %0.25 ve %0.50 oranlarında polipropilen elyaf eklenmesi dolaylı çekme dayanımında hafif bir artışa neden olmuştur. Ancak, %0.75 ve %1 oranlarında elyaf eklenmesinin, çekme dayanımın etkisi olmadığını görülmektedir. Çimento içeriğinin numunelerin çekme dayanımı üzerindeki etkisinin yadsınamaz olduğu, yani düşük bir çimento ilavesinin bile dayanımlarda önemli bir artışa yol açtığı Şekil 5.12b'den görülmektedir. Doğal zemin çekme dayanım 0.034 MPa iken 3 ve 28 günlük %10 çimento içeren karışımın sırasıyla 0.298 ile 0.389 MPa değerlere ulaşmıştır.



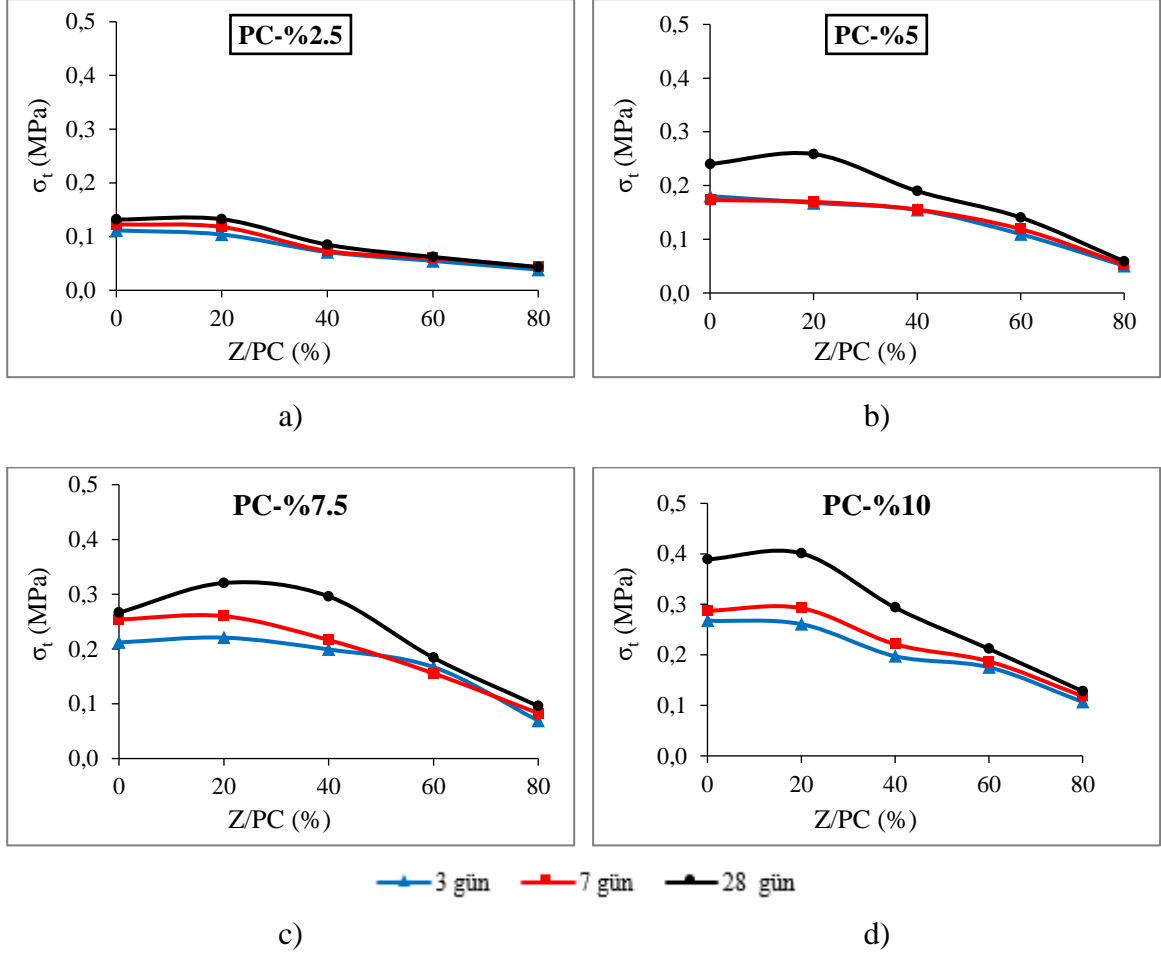
Şekil 5.12: Stabilize edilmiş numunelerin dolaylı çekme dayanımı a) kil ve polipropilen elyaf, b) kil ve Portland çimentosu

Şekil 5.13 çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlere polipropilen elyaf eklenmesinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, tüm karışımların kür süresi arttıkça dolaylı çekme dayanımının arttığını göstermektedir. Polipropilen elyaf içeriğinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, en iyi performans %0.25 elyaf içeren karışımlarda elde edilmiştir. Örneğin, %10 çimento içeren karışımın 28 günlük dolaylı çekme dayanımı 0.389 MPa iken, %0.25 elyaf ilavesiyle %13 artarak 0.440 MPa'a yükselmiştir. Ancak, aynı karışıma %1 elyaf eklenmesi durumunda, dolaylı çekme dayanımı %25 azalarak 0.290 MPa'a düşmüştür. Bu nedenle, çimento ile stabilize edilmiş kilde %0.25 polipropilen elyaf takviyesinin dolaylı çekme dayanımını artırdığı açıkça görülmektedir. Ancak, polipropilen elyaf oranı %0.25'in üzerine çıktığında tüm karışımlarda dolaylı çekme dayanımında bir düşüş gözlemlenmiştir.



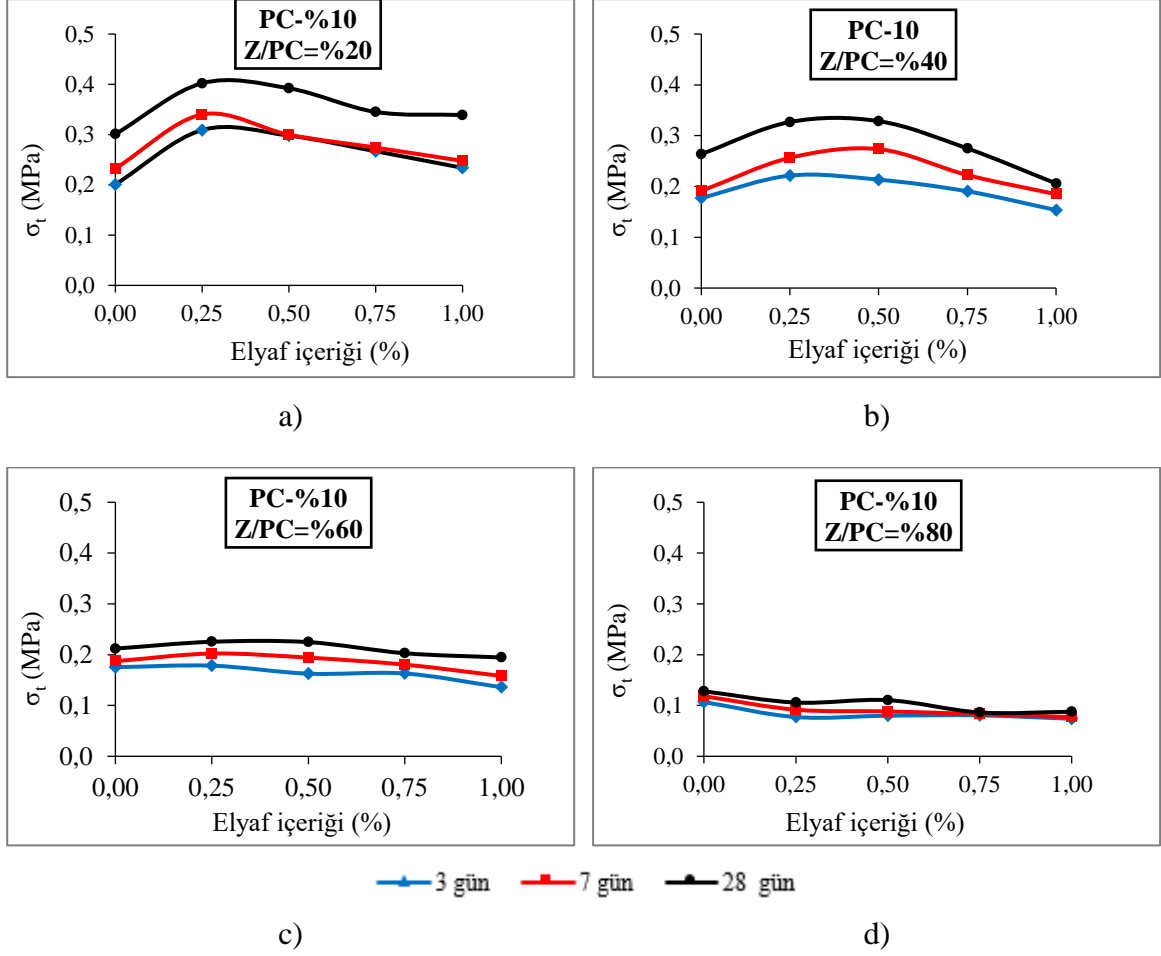
Şekil 5.13: Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlere polipropilen elyaf eklenmesinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi

Çimento ve zeolitin Bartın killi zeminlerin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkilerini Şekil 5.14'te göstermektedir. Verilen her zeolit ikamesi için çekme dayanımı çimento içeriğinin artmasıyla arttığı görülmektedir. Ayrıca zeolit ikamesini %20'ye kadar artırarak çekme dayanımını artırılmış, daha yüksek zeolit ikamesi için (>%20) düşüş eğilimi gözlenmiştir. Zeolit ilavesinin %20'ye kadar olan oranlarda karışımların çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu, ancak basınç dayanımında aynı performansın sergilenmediği görülmüştür.



Şekil 5.14: Çimento ve zeolitin Bartın killi zeminler üzerindeki etkisi

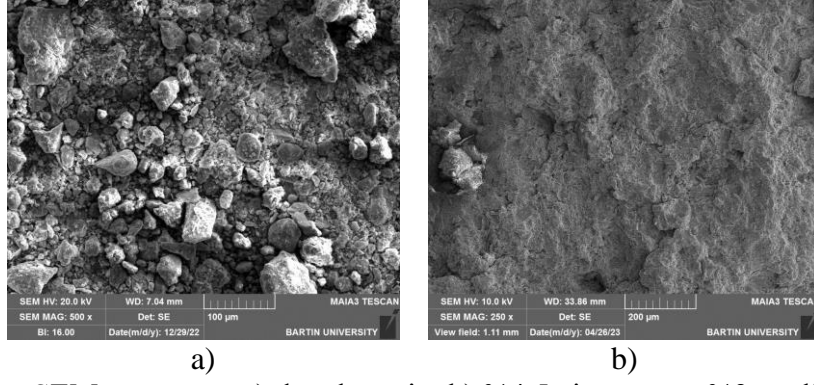
Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlere zeolit ve polipropilen elyaf eklenmesinin dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmış, deney sonuçları Ek.2’de verilmiş, ayrıca %10 çimento ve zeolit içeren karışımlara ait deney sonuçları Şekil 5.15’te gösterilmiştir. Çimento içeriğinin %20 zeolit ile değiştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesiyle elde edilen %10 katkıli karışımın diğer karışımlardan daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Örneğin, %10 çimento içeren karışımın 28 günlük dolaylı çekme dayanımı 0.389 MPa iken, %10 çimento içeriğinde %20 zeolit ve %0.25 elyaf ilavesiyle %3.3 artışla 0.402 MPa'a yükselmiştir. Ancak, çimento içeriğinde zeolit ve polipropilen elyaf yüzdesi arttıkça, dolaylı çekme dayanım değerleri düşüş göstermiştir. Özellikle yüksek zeolit ve elyaf içeriği, dolaylı çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir.



Şekil 5.15: Çimento ile stabilize edilmiş numunelerin zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin dolaylı çekme dayanımına etkisi

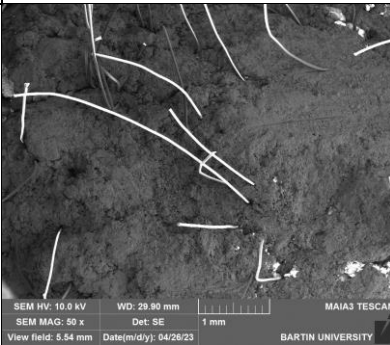
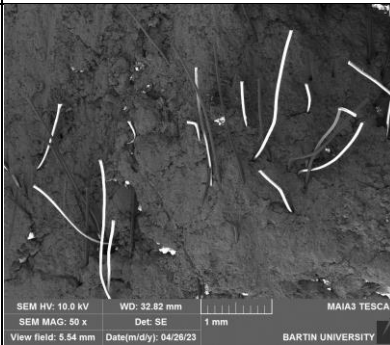
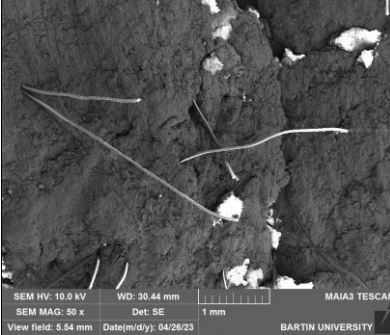
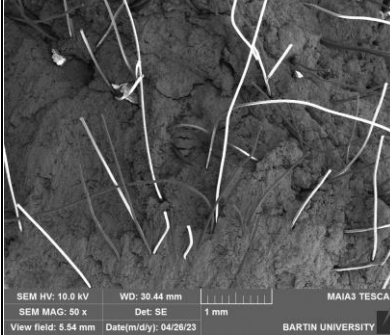
5.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları

Serbest basınç deneyi sonrasında kırılan numunelerden seçilen örneklerin mikro yapı görüntülerini elde edebilmek için SEM analizi yapılmıştır. Şekil 5.16a'da doğal kil numunesi, Şekil 5.16b'da %4.5çimento ve %3 zeolit içeren karışım numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, doğal zemin parçacıkları görünüşte dağınık, birbirinden ayrı ve boşluklarla dolu bir yapıya sahiptir. İncelenen kilin düşük dayanımının ana nedeni, zayıf iskelet yapısından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte doğal zemine %4.5 çimento ve %3 zeolit ilavesiyle karışım matrisini daha kompakt ve boşluksuz bir yapı kazandırılmıştır, bu da karışımın mukavemetinin artışına neden olmuştur. Ancak zeolit oranının artmasıyla (Şekil 5.17), karışımlarda zemin parçacıkları arasındaki bağlar zayıflamış ve matrisi çimentoya kıyasla daha gevşek bir yapı kazandırılmış, bu da mukavemet üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmuştur.



Şekil 5.16: SEM görüntüsü a) doğal zemin, b) %4.5 çimento ve %3 zeolit karışımı

Çimento ve zeolit ile güçlendirilmiş zemin ile polipropilen elyaflar arasındaki sürtünme ve elyaflarda oluşan çekme gerilmelerin mukavemet üzerinde etkisi mekanik deneyleri sonuçlarından görülmüştür. %0.25 oranında elyaf katkısıyla elde edilen karışımlarda bu etkinin beklenen sonuçları verdiği gözlenmiştir. Ancak, yüksek miktarda elyaf katkısıyla yapılan karışımlarda, daha sıkı bir ağ yapısı oluşmuş ve liflerin oluşturduğu sürtünme etkisi, Şekil 5.17’de görüldüğü gibi birbirini etkileyen çatlakların oluşmasına ve mukavemetin azalmasına yol açmıştır.

Çimento ve zeolit kombinasyonu	Polipropilen elyaf içeriği (%)	
	0.25	0.50
%4.5PC+%3.0Z		
%3.0PC+%4.5Z		

Şekil 5.17: Çimento-zeolit ve polipropilen elyaf karışım numunelerine ait SEM görüntüleri

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin etkisi deneysel olarak araştırılmış, serbest basınç ve dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkileri analiz edilerek tartışılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen nihai sonuç ve öneriler aşağıda verilmektedir.

- Bartın ili yumuşak killi zeminlerinde çimento içeriğinin %2.5'tan %10'a çıkarılması, hem maksimum kuru birim hacim ağırlığı hem de optimum su muhtevalarının artmasına neden olurken, zeolit ve polipropilen elyaf içeriğinin artırılması, zemin-bağlayıcı karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmasına ve optimum su muhtevası artmasına neden olmuştur. Düşük yoğunlukları nedeniyle, polipropilen elyaf eklenmesi, stabilize edilmiş zemin matrisinin yoğunluğunu azaltmış. Sonuç olarak, kil parçacıkları ve polipropilen elyaflar arasındaki etkileşimin daha fazla artmasıyla, zeminin veya stabilizatörün yıkanarak uzaklaşmasına izin vermeyen birbirine bağlı bir matris oluşturulmuştur.
- Karışımların tane birim hacim ağırlıklarına yönelik yapılan incelemede, çimento ilavesinin doğal zeminin tane birim hacim ağırlığını artırdığı, zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin ise düşürdüğü gözlemlenmiştir. Doğal zeminin tane birim hacim ağırlığı 2,67 olarak belirlenirken, %10 çimento ilavesiyle bu değer 2,76'ya yükselmiştir. Öte yandan, zeolit ilavesi (Z/PC=%40) ile tane birim hacim ağırlığı 2,70'e düşerken, polipropilen elyaf ilavesi (Z/PC=%40+%1PE) ile bu değer 2,54 olarak tespit edilmiştir.
- Serbest basınç deneyi sonuçlarına göre, doğal zemine çimento ilavesiyle serbest basınç dayanımında net bir artış gözlenmiştir. Ayrıca, polipropilen elyaf ilavesiyle de doğal zeminin basınç dayanımında bir miktar artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, polipropilen elyaf yüzdesinin artmasıyla serbest basınç dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün ana nedeni, karışım numunelerinin hazırlanması sırasında elyafların homojen bir şekilde dağılamaması ve sıkıştırma sürecinde topaklanmaların oluşmasıdır. Sadece çimento ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, deney sonucunda doğal zemin numunesine göre daha az boy kısılması ve numunenin az deformasyona

uğramış ve gevrek bir şekilde kırıldığı gözlenmiştir. Polipropilen elyaf ilavesiyle birlikte yapılan deneylerde ise boy kışalmasını arttığı ve numunenin kırılmadan önce biraz daha fazla deformatsyona uğradığı görülmüştür. Çimento ile zeolitin yer değıştirilmesi, bütün kür süreleri için serbest basınç dayanımlarını düşürmüştür. Ancak, bu değışiklik daha esnek bir yapıyı elde edilmesini sağlamıştır. 28 gün kürlenmiş, %7.5 ve %10 çimentolu karışımlarda çimentonun %20'ye kadar zeolit ile yer değıştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesi ile serbest basınç dayanımında artışa neden olurken, daha yüksek zeolit içeriğinin artması serbest basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur. Zeolit katkısının çimento kullanımında basınç dayanımı sonuçlarına göre uygun olduğu oranlar %7.5 ve %10 olarak belirlenmiştir. Çimento ile karşılaştırıldığında ise en uygun zeolit katkı oranının %20 olduğu bulunmuştur.

- Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyafın elastisite modülüne etkisini incelemiştir. Doğal zeminin elastisite modülü 12 MPa olarak belirlenirken %10 çimento ile stabilize edilmiş 28 günlük numunelerde ise elastisite modülü 320 MPa olarak tespit edilmiştir. Bunula birlikte %10 karışımın çimento içeriğinin %20'ye kadar zeolit ile değıştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesi, elastisite modülünü 326 MPa'ya yükseltmiştir. Ancak aynı karışıma %1 polipropilen elyaf eklenmesi elastisite modülünü 143 MPa'ya düşürmüştür. Bu sonuçlar, çimento, zeolit ve polipropilen elyafın farklı oranlardaki karışımlarda elastisite modülü üzerinde farklı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Çimento içeriğinin artması stabilize edilmiş numunelerin elastisite modülünü artırmıştır. Zeolit ilavesi ise elastisite modülünde kademeli bir azalmaya neden olmuştur. Polipropilen elyafın etkisi ise oranına bağılı olarak değışmektedir. Düşük oranlarda elastisite modülünü artırırken, aşırı elyaf katılımı elastisite modülünün düşmesine yol açmıştır.
- Dolaylı çekme deneyi sonuçlarına göre, doğal zemine çimento ilavesiyle çekme dayanımında belirgin bir artış gözlenmiştir. Aynı şekilde, polipropilen elyaf ilavesi de doğal zeminin çekme dayanımında bir miktar artışa neden olmuştur. Ancak, polipropilen elyaf yüzdesinin artmasıyla dolaylı çekme dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. Çimentonun %20'ye kadar zeolit ile değıştirilmesi, tüm karışımlar ve kür süreleri için çekme dayanımlarını artırmıştır. Ancak, daha yüksek zeolit katkılarıyla birlikte çekme dayanımlarında azalma eğilimi gözlenmiştir. Çimentonun %20'ye

kadar zeolit ile değiştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesi, diğer karışımlara göre daha yüksek çekme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak, çimentonun ve polipropilen elyafın çekme dayanımını artırdığını, ancak yüksek zeolit ve elyaf içeriğinin çekme dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde %20 zeolit ile çimentonun değiştirilmesi ve %0.25 polipropilen elyaf eklenmesi, en iyi çekme dayanımını sağlayan bir kombinasyon olmuştur.

- Zeolitin çimento ile yer değiştirilmesi sonucunda, karışımların 28 gün süreyle kürlenmesinden sonra mukavemetlerinde bir azalma gözlenmesi, zeolitin puzolanik reaksiyonunun tamamlanmadığı düşüncesiyle ilişkilendirilmektedir. Bu durumda, zeolitin mukavemete etkisinin daha uzun kürlenme süreleri boyunca araştırılması gereklidir.

KAYNAKÇA

- Abbaspour, M., Aflaki, E., ve Nejad, F. M. (2019). Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of cleaner production*, 207, 1059-1071.
- Akbari, H. R., Sharafi, H., ve Goodarzi, A. R. (2021). Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6), 1470-1482.
- Ali, N., ve Raj, V. S. (2020). Effect of polypropylene fibre on swelling behaviour of black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*.
- American society of civil engineers. Committee on placement and improvement of soils. (1978). *Soil Improvement: History, Capabilities, and Outlook*. American Society of civil engineers.
- ASTM International. 2019. "Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use with Lime." in *Annual book of ASTM Standards*.
- Ayan, E. (2009). *Derin zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bagherian, A. (2003). *Mazandaran Roads Stabilization with Lime and Rice Husk Ash*.
- Bağriaçık, B., Beycioğlu, A., Topolinski, S., Akmaz, E., Sert, S., ve Güner, E. D. (2021). Assessment of glass fiber-reinforced polyester pipe powder in soil improvement. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(3), 742-753.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., ve Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and building materials*, 19(6), 448-453.
- Boroumandzadeh, B. ve Pakbaz, M. S. (2012). Evaluation of effect of cementation on drained shear strength of over consolidated clay soils. *World Appl Sci J*, 16(10), 1375-1379.
- Boz, A., ve Sezer, A. (2018). Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 359-366.
- Brown, R. E. (1977). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(12), 1437-1451.
- Bugge, W. A., ve Bartelsmeyer, R. R. (1961). Soil stabilization with Portland cement. In *Highway Research Board* (Vol. 292, pp. 1-15).
- Charles, J. A. (2002). Ground improvement: the interaction of engineering science and experience-based technology. *Geotechnique*, 52(7), 527-532.

- Chauhan, M. S., Mittal, S., ve Mohanty, B. (2008). Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and geomembranes*, 26(5), 429-435.
- Chen, M., Shen, S. L., Arulrajah, A., Wu, H. N., Hou, D. W., ve Xu, Y. S. (2015). Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(6), 515-523.
- Chenarboni, H. A., Lajevardi, S. H., MolaAbasi, H., ve Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630.
- El-Reedy, M. A. (2017). Soil Investigation and Pile Design Onshore Structural Design Calculations. *Power Plant and Energy Processing Facilities* 2017345–385.
- Ergun, U., Özkan Y, Önalp A., ve Keçeli A., 2006. Parsel bazında zemin-temel etüdüleri ve zemin iyileştirme işleri hakkında yönetmelik taslağı ön raporu. Afet işleri genel müdürlüğü, Ankara.
- Ferguson, G. (1993). Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent. fly ash for soil improvement. *asce geotechnical special publication no. 36*.
- Festugato, L., da Silva, A. P., Diambra, A., Consoli, N. C., ve Ibraim, E. (2018). Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(2), 155-165.
- Gholhaki, M., Hajforoush, M., ve Kazemi, M. (2018). An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 158, 173-180.
- Girish, M. S., ve Ramanatha Ayyar, T. S. (2000). Improvement of durability of coir geotextiles. In *Proceedings for the Indian Geotextiles Conference, Bombay, India* (pp. 309-310).
- Goodarzian, A., Ghasemipanah, A., Moayed, R. Z., ve Niroumand, H. (2014). Influence of nanozeolite particles on improvement of clayey soil. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 14(1), 40-48.
- Gupta R., Jain P.K. ve Kumar R. (2019). Effect of polypropylene fibre and curing period on unconfined compressive strength of cemented-black cotton soil. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 7244–7250. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F9081.109119>
- Hamidi, A., ve Hooresfand, M. (2013). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 1-9.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., ve Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and building materials*, 30, 100-116.

- Hong, C. S., Shackelford, C. D., ve Malusis, M. A. (2012). Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(1), 15-25.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. ve Bergado, D. T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(10), 1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. ve Nagaraj, T. S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. *Geotechnique*, 53(4), 439-444.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddepong, A. ve Chinkulkijniwat, A. (2011). Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations. *Soils and Foundations*, 51(2), 239-251.
- Kalantari, B., Huat, B. B., ve Prasad, A. (2010). Effect of polypropylene fibers on the California Bearing Ratio of air cured stabilized tropical peat soil. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 1-6.
- Kaniraj, S. R., ve Havanagi, V. G. (2001). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(7), 574-584.
- Kaya, A., ve Durukan, S. (2004). Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner. *Applied Clay Science*, 25(1-2), 83-91.
- Kirmani, S. M. H. (2004). Consolidation of soil for foundation by using sand drains. *IEP-SAC Journal*, 2005.
- Kilic, G. (2008). Çimento ile zemin stabilizasyonu. MSc, Yildiz Technical University, İstanbul, Turkey.
- Kordnaeij, A., Moayed, R. Z. ve Soleimani, M. (2019). Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement. *Soils and Foundations*, 59(4), 905-919.
- Kovačević, M. S., Jurić-Kačunić, D., ve Ivanković, A. (2006, May). Interactive Geotechnical Design of Bridge Foundations. In *International Conference on Bridges* (pp. 275-283).
- Kök, B. V., YILMAZ, M. ve Geçkil, A. (2012). Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 18(3).
- Kumar, A. ve Gupta, D. (2016). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 466-474.
- Li, V. C. (2002). Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 660-686.

- Ling, F. N., Kassim, K. A., Abdul Karim, A. T., ve Kan, J. H. (2015). Strength and stiffness of artificial organic soil admixed with lime zeolite. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 773, pp. 1422-1427). Trans Tech Publications Ltd.
- Ling, F. N. L., Kassim, K. A., Abdul Karim, A. T., ve Chan, T. W. (2013). Stabilization of artificial organic soil at room temperature using blended lime zeolite. In *Advanced materials research* (Vol. 723, pp. 985-992). Trans Tech Publications Ltd.
- Mehta, P. K. (1999). Concrete technology for sustainable development. *Concrete international*, 21(11), 47-53.
- MolaAbasi, H., Kharazmi, P., Khajeh, A., Saberian, M., Chenari, R. J., Harandi, M., ve Li, J. (2022). Low plasticity clay stabilized with cement and zeolite: An experimental and environmental impact study. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106408.
- MolaAbasi, H., Saberian, M., ve Li, J. (2019). Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition. *Construction and Building Materials*, 202, 784-795.
- Mola-Abasi, H., Kordtabar, B., ve Kordnaeij, A. (2016). Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 1539-1551.
- Muntohar, A. S. (2009). Influence of plastic waste fibers on the strength of lime-rice husk ash stabilized clay soil. *Civil Engineering Dimension*, 11(1), pp-32.
- Nelson, D. ve Miller, J., (1992). *expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*.
- Nicholson, P.G., 2015. *Soil improvement and ground modification methods*. Chapter 5 – Shallow Compaction.
- Nicholson, P. G. ve Kashyap, V. (1993). Flyash stabilization of tropical Hawaiian soils. Fly ash for soil improvement. ASCE Geotechnical special publication no. 36.
- Norouznejad, G., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S. M. ve Afzalirad, M. (2021). Effect of zeolite on the compaction properties and California Bearing Ratio (CBR) of cemented sand. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 11(3), 229-239.
- Ören, A. H., Kaya, A., ve Kayalar, A. Ş. (2011). Hydraulic conductivity of zeolite–bentonite mixtures in comparison with sand–bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1343-1353.
- Özaydın, K. (2012). Zeminlerin iyileştirilmesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi.

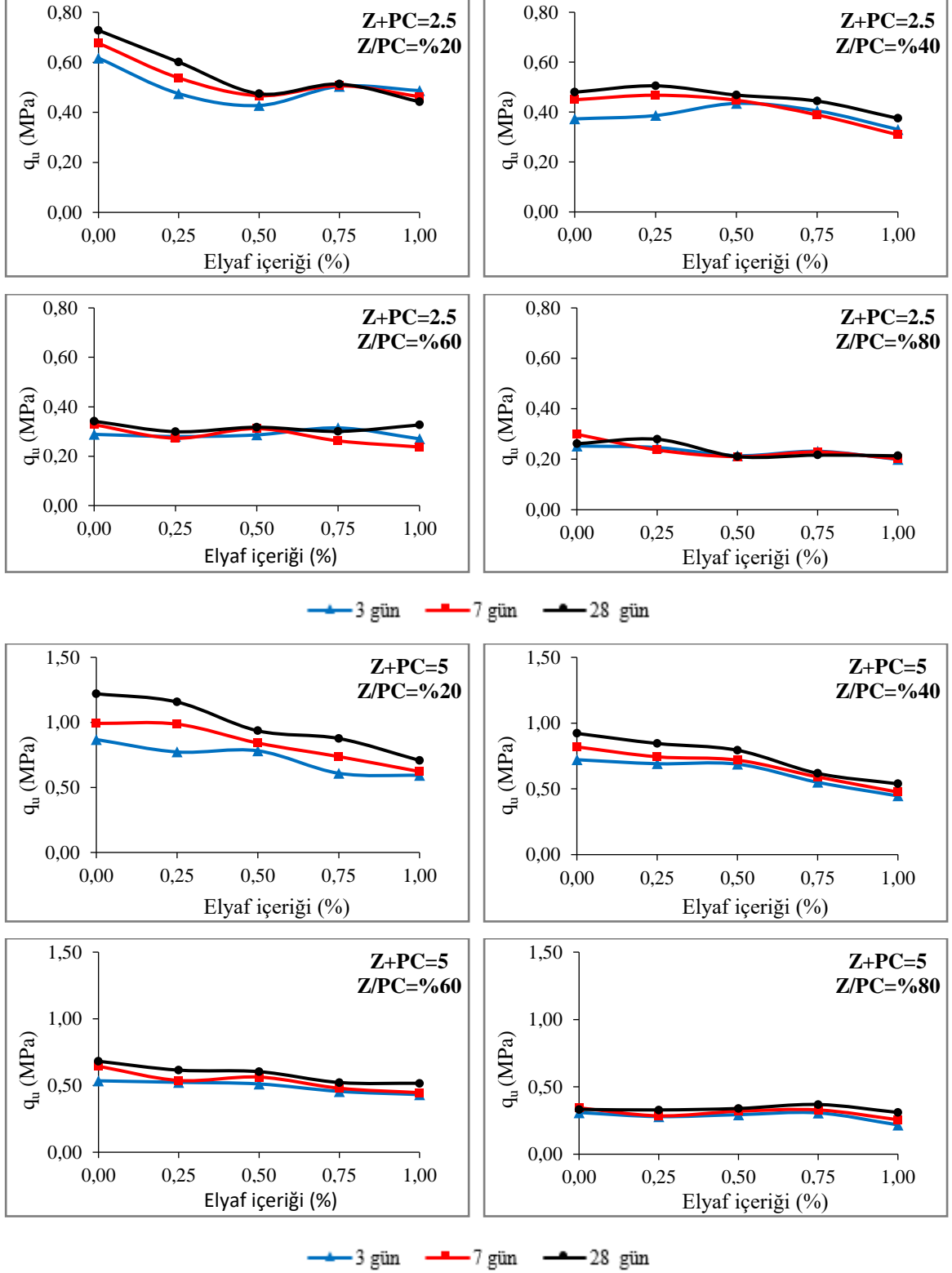
- Öztürk, S. (2007). Engineering properties of kaolinite clay reinforcement with polypropylene fibers (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, BÜ Graduate School of Science Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Istanbul).
- Pakbaz, M. S., ve Alipour, R. (2012). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied Clay Science*, 67, 1-4.
- Patel, A. (2019). Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. Woodhead Publishing.
- Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C. ve Lin, Z. S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and building materials*, 13(8), 427-432.
- Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B., ve Fasihnikoutalab, M. H. (2015). Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. *Transportation Geotechnics*, 3, 24-35.
- Punthutaecha, K., Puppala, A. J., Vanapalli, S. K. ve Inyang, H. (2006). Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers. *Journal of materials in Civil Engineering*, 18(2), 295-306.
- Rahgozar, M. A., Saberian, M., ve Li, J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics*, 14, 52-60.
- Raj, P. P. (2008). Soil mechanics and foundation engineering. Pearson Education India.
- Raj, P. P. (1999). Ground improvement techniques (HB). Firewall Media.
- Ramesh, H. N., Manoj Krishna, K. V. ve Mamatha, H. V. (2010). Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil. *Geomechanics & engineering*, 2(1), 19-28.
- Ronoh, V., Too, J. K., Kaluli, J. W., ve Victor, M. R. (2014). Cement effects on the physical properties of expansive clay soil and the compressive strength of compressed interlocking clay blocks. *Eur Int J Sci Technol*, 3(8), 74-82.
- Roshan, K., Choobbasti, A. J., ve Kutanaei, S. S. (2020). Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition. *Transportation Geotechnics*, 23, 100359.
- Saberian, M., Li, J., Nguyen, B., ve Wang, G. (2018). Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 178, 51-58.
- Savaş, H. (2016). Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(6), 589-598.

- Schaefer, V. R., Mitchell, J. K., Berg, R. R., Filz, G. M., ve Douglas, S. C. (2012). Ground improvement in the 21st century: a comprehensive web-based information system. In *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012* (pp. 272-293).
- Schoute, E. J. (1999). Chemical stabilization of soft clay. *Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands*, (188), 15-39.
- Sevencan, Ü. (2009). Polipropilen fiber ve uçucu kül katkılı ankara kilinin geoteknik özelliklerinin araştırılması (Master's thesis, Kırıkkale Üniversitesi).
- Shang, H. (2015). Geotechnical laboratory characterization of sand-zeolite mixtures.
- Sherwood, P. T. 1995. *Soil Stabilization with Cement and Lime*. HMSO, London,.
- Shi, J. X. (2013). The applications of zeolite in sustainable binders for soil stabilization. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 256, pp. 112-115). Trans Tech Publications Ltd.
- Singh, S. P. ve Sharan, A. (2015). Strength characteristics of fiber-reinforced compacted pond ash. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(2), 132-139.
- Stapelfeldt, T. (2006). Preloading and vertical drains. Electronic publication, http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/Prel oading_and_vertical_drains. pdf.
- Tachir, C. (2015). Samsun terme kombine doğalgaz çevrim santrali zeminlerinin fore kazık ve jet grout yöntemleri ile iyileştirilmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tang, C. S., Wang, D. Y., Cui, Y. J., Shi, B., ve Li, J. (2016). Tensile strength of fiber-reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., ve Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- TS 1900-1, (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 1900-2, (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 197-1:2012- Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri
- TS 7654: 2019. Kayaçların çekme mukavemetinin dolaylı (indirekt) metotla tayini.
- Turkoz, M. ve Vural, P. (2013). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(4), 395-405.

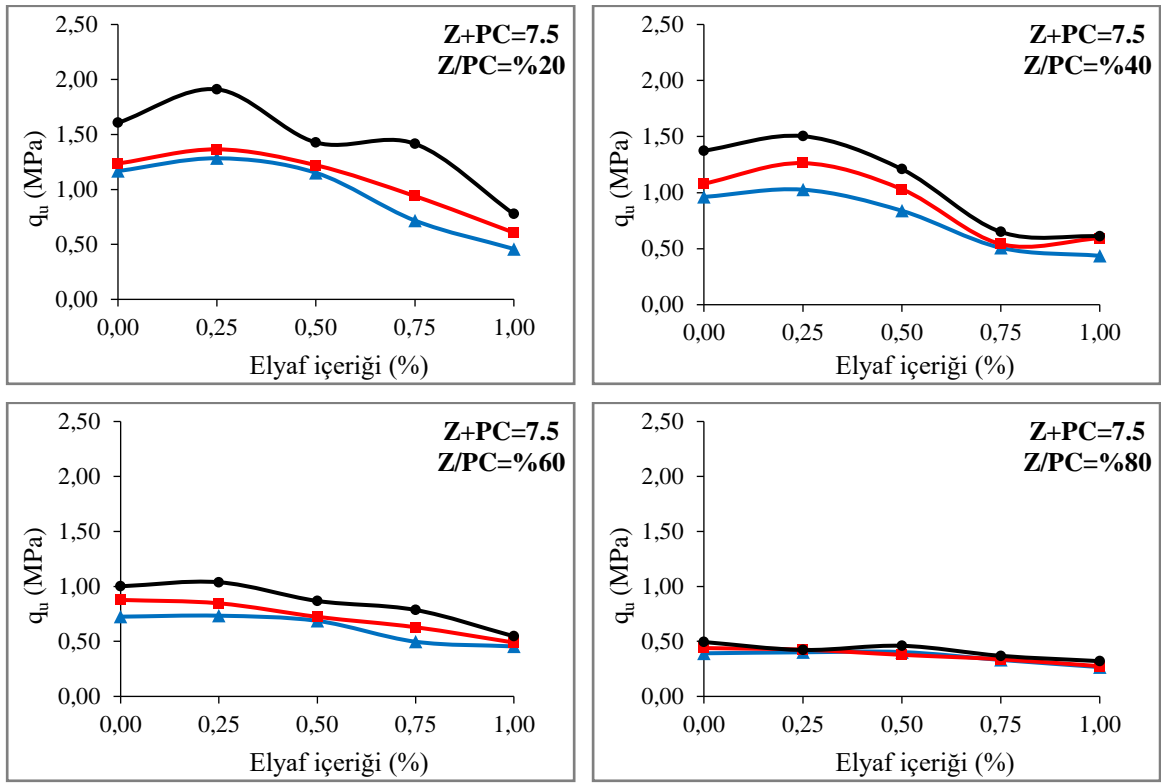
- Wattanasanticharoen, E. (2000). Investigations to evaluate the performance of four selected stabilization methods on soft subgrade soils of southeast Arlington. The University of Texas at Arlington.
- Wei, L., Chai, S. X., Zhang, H. Y., ve Shi, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, 172, 300-308.
- Winterkorn, H. F., ve Pamukcu, S. (1991). Soil stabilization and grouting. *Foundation engineering handbook*, 317-378.
- Wu, H. C. ve Li, V. C. (1999). Fiber/cement interface tailoring with plasma treatment. *Cement and Concrete Composites*, 21(3), 205-212.
- Yadav, J. S. ve Tiwari, S. K. (2017). Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied Clay Science*, 149, 97-110.

EKLER

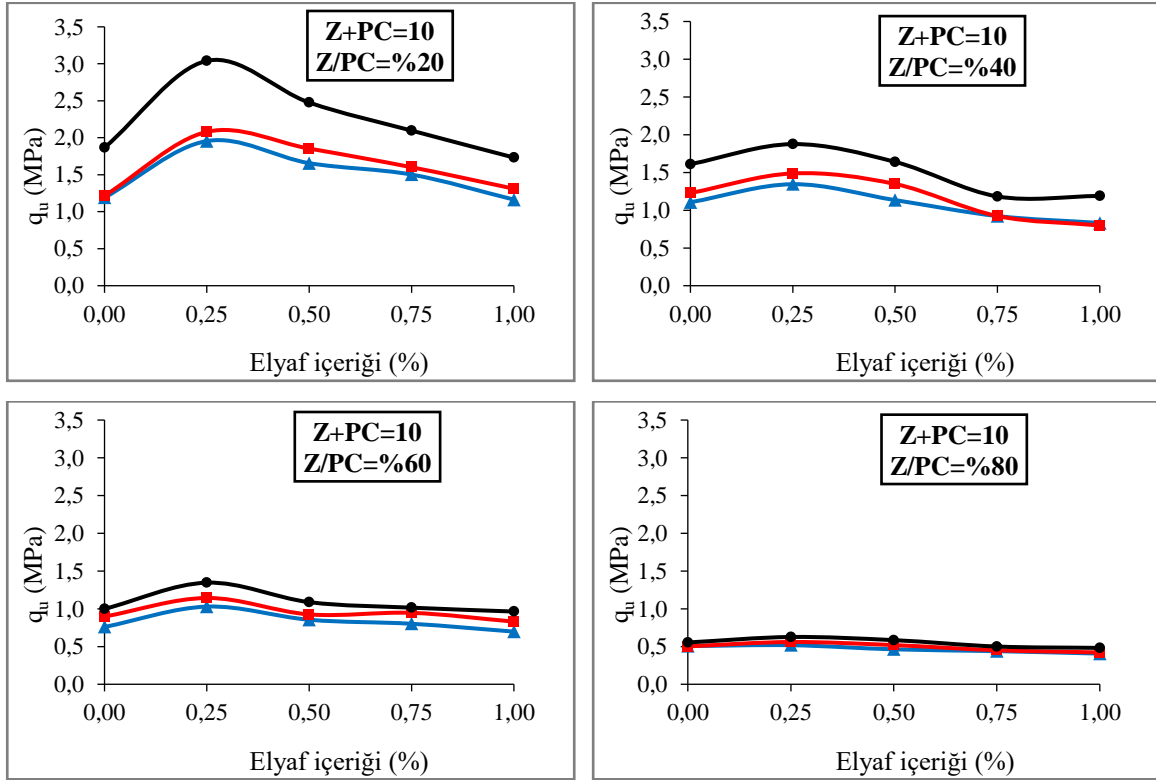
EK.1: Serbest basınç dayanım deney sonuçları



Ek.1 (devam ediyor)

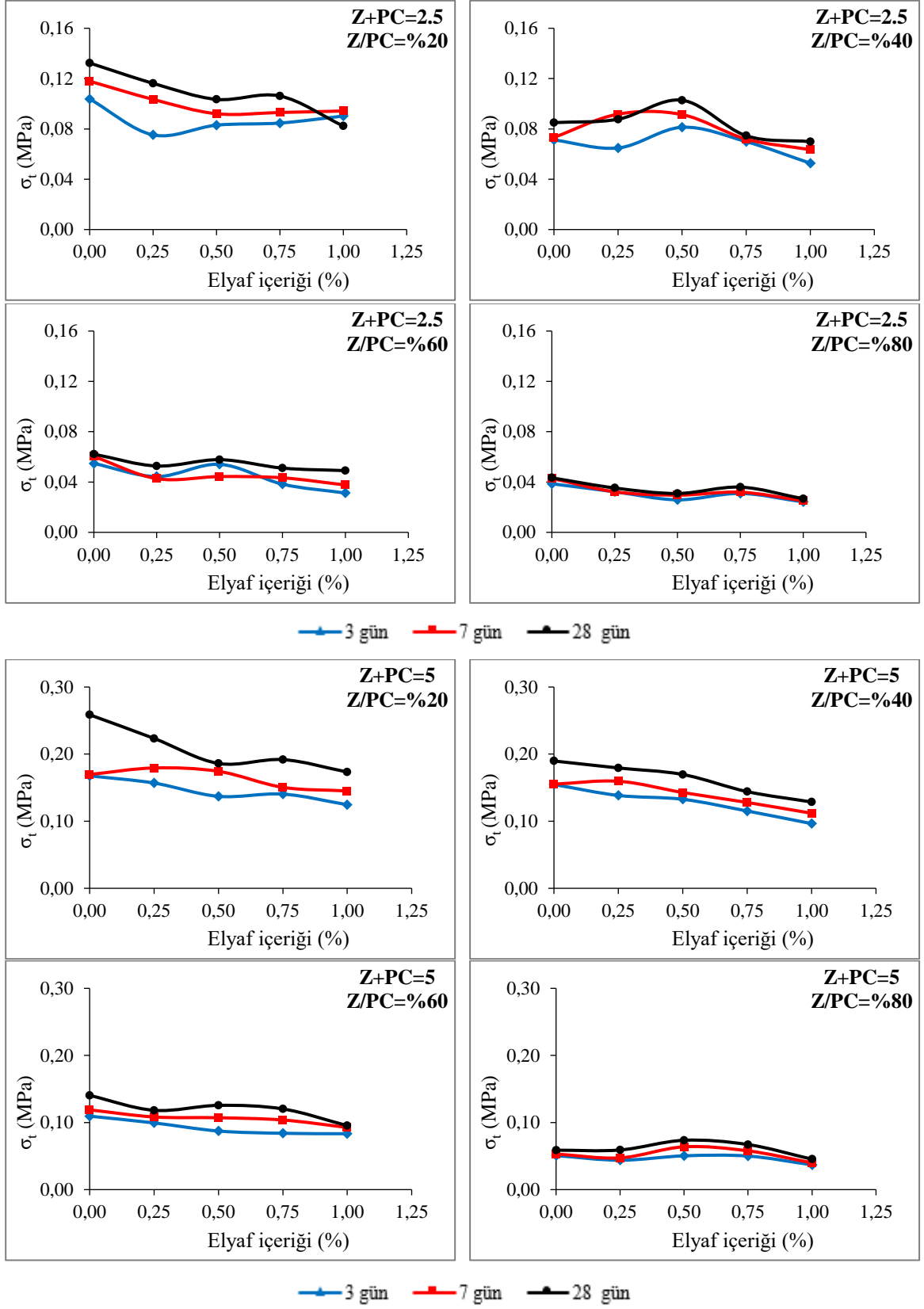


—▲— 3 gün —■— 7 gün —●— 28 gün

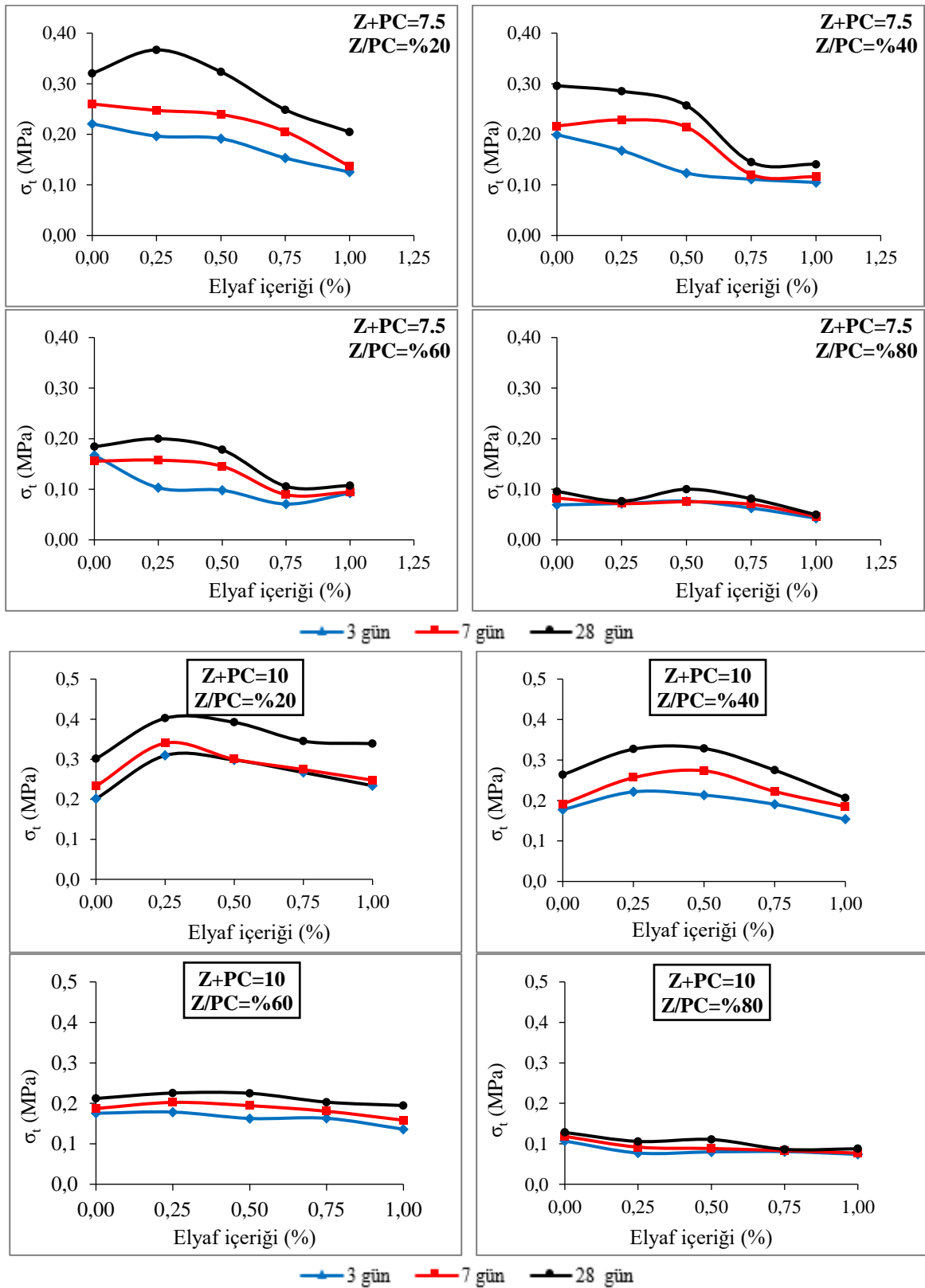


—▲— 3 gün —■— 7 gün —●— 28 gün

EK.2: Dolaylı çekme dayanım deney sonuçları



Ek.2 (devam ediyor)



ÖZGEÇMİŞ