



**POLİPROPİLEN LİF DONATILI GEOPOLİMER
DERİN KARIŞTIRMA KOLONUNUN YANIT YÜZEY
YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU VE SICAKLIK
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Büşra AVLAYAN

Yüksek Lisans Tezi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

2022

(Her Hakkı Saklıdır.)

**T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**POLİPROPİLEN LİF DONATILI GEOPOLİMER DERİN KARIŞTIRMA KOLONUNUN
YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU VE SICAKLIK ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Optimization of Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Deep Mixing Column by
Response Surface Methodology and Investigation of the Temperature Effect)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra AVLAYAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU

Bayburt

Eylül, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, inşaat mühendisi Büşra AVLAYAN tarafından hazırlanan “*Polipropilen Lif Donatılı Geopolimer Derin Karıştırma Kolonunun Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu ve Sıcaklık Etkisinin Araştırılması*” adlı bu çalışma 05/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ömer CAN

İmza:

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Muhittin TURAN

İmza:

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi H. Alper KAMILOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../2022

Doç. Dr. Murat KUL

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum hazırlanan “Polipropilen Lif Donatılı Geopolimer Derin Karıştırma Kolonunun Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu ve Sıcaklık Etkisinin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

05/09/2022

Büşra AVLAYAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış olup polipropilen lif ilaveli derin karıştırma kolonlarında sıcaklık etkisinin araştırılması üzerine çalışılmıştır.

Tez çalışmam boyunca çalışmamı tamamlamamda yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans hayatım boyunca bilgisini, yardımlarını esirgemeyen ve her zaman destekleyen ikinci danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Hem tez çalışmamda hem de laboratuvar aşamasında sabırla beni destekleyen ve yardım eden meslektaşım ve dostum inşaat mühendisi Esra YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım ve eğitim hayatımda her zaman yanımda olan ve desteklerini her zaman arkamda hissettiğim sevgili annem Emine AVLAYAN'a, sevgili babam Sait AVLAYAN'a ve çok sevgili abim Emre AVLAYAN'a teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Bu yolda ilerlememde manevi desteğini her zaman arkamda hissettiğim yardımlarını benden esirgemeyen çok sevgili harita mühendisi Tuğrul YILDIRIM'a teşekkürü borç bilirim.

Sevgili yeğenim Gökçe Ela'ya ithafen

ÖZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
POLİPROPİLEN LİF DONATILI GEOPOLİMER DERİN KARIŞTIRMA
KOLONUNUN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU VE SICAKLIK
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Büşra AVLAYAN

Eylül 2022, 45 sayfa

Boyları 30m'ye varan derin karıştırma kolonları kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde sıkça kullanılan derin zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Tamamen zemine gömülü halde çalışan derin karıştırma kolonları kürlerini oluşturuldukları zemin ortamından almaktadır. Bu durumda zemin derinliği boyunca değişen zemin sıcaklığı aynı zamanda derin karıştırma kolonlarının kür sıcaklığı olmaktadır. Derin karıştırma kolonlarının imal edildikleri bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı, imalatın yapıldığı günün hava sıcaklığı, zeminin termal iletkenlik katsayısı gibi parametreler zemin derinliği boyunca sıcaklığın yüzey sıcaklığından farklı olmasında rol oynar. Bu nedenle çoğu zaman zemin derinliği boyunca sıcaklık yüzey sıcaklığından farklı olur. Bu durum derin karıştırma kolonlarında zemin derinliği boyunca kür sıcaklığının değişken olması durumunu doğurur. Bu da kolonların taşıma gücüne etki eder. Yapılan bu tez çalışmasında sıcaklık etkisinin yüksek plastisiteli kil içeren bir zemin ortamında polipropilen donatı katkılı geopolimer esaslı derin karıştırma kolonu harcının mekanik özelliklerine olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma kapsamında Amerikan Karayolları İdaresi'nin (FHWA) derin karıştırma kolonları için önermiş olduğu numune hazırlama şekilleri dikkate alınarak 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde numuneler oluşturulmuş. Geopolimer malzemenin elde edilmesinde bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Aktivatör olarak kütlece %50-%50 oranında 10 M NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri kullanılmıştır. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yanıt yüzey yöntemi kullanılarak maksimum serbest basınç dayanımını veren bağlayıcı miktarı ve aktivatör içeriği belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında optimum miktarda bağlayıcı ve aktivatöre farklı oranlarda 6mm uzunluğunda polipropilen donatı karıştırılarak elde edilen numunelerin serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Bu suretle maksimum serbest basınç dayanımını veren donatı içeriği elde edilmiştir. Çalışmanın üçüncü adımında ideal miktarları belirlenen bağlayıcı, aktivatör ve polipropilen lif katkıları ile zemin numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 5°C, 10°C, 20°C ve 30°C'lik kür sıcaklıklarında 7 gün ve 28 gün kürlenmiştir. Kürlenen numuneler serbest basınç deneyleri ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Bu suretle sıcaklık etkisinin serbest basınç dayanımı, elastisite modülü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda numunelerin mekanik özelliklerinin 20°C'lik kür sıcaklığına kadar artan sıcaklıkla birlikte dikkate değer şekilde arttığı, bu sıcaklık değerinin üzerinde mekanik özelliklerde büyük bir değişimin olmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Derin karıştırma kolonu, geopolimerizasyon, yanıt yüzey yöntemi, kür sıcaklığı, mekanik özellikler.

ABSTRACT
MASTER THESIS
OPTIMIZATION OF POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED GEOPOLYMER
DEEP MIXING COLUMN BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY AND
INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE EFFECT

Büşra AVLAYAN

September 2022, 45 pages

Deep mixing columns up to 30m in length are one of the deep soil improvement methods frequently used in cohesive and non-cohesive soils. Deep mixing columns, which operate completely buried in the soil, take their cure from the soil environment in which they are formed. In this case, the soil temperature that changes throughout the soil depth is also the curing temperature of the deep mixing columns. The parameters such as annual mean air temperature, surface air temperature, and thermal conductivity of the soil play vital role in the variation of soil temperature along the soil depth. Therefore, mostly the temperature along the soil depth differs significantly from the surface temperature. This causes subjecting the different curing temperatures of the deep mix columns along the soil depth. This affects the bearing capacity and settlement parameters of the columns. Within the scope of the study, soil samples of 50 mm diameter and 100 mm height were prepared considering the recommendations of Federal Highway Administration (FHWA) for deep mixing columns. This thesis study aimed to determine the effect of temperature on the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced geopolymer-based deep mixing column mortar to stabilize high plasticity clayey soils. The study used F-class fly ash as an alkali-activated binder in the geopolymerization process. The mixture of 10 M NaOH solution and Na_2SiO_3 solutions was used as an alkali activator. The study comprises three stages. In the first stage, alkali-activated precursor and alkali activator amounts were optimized using Response Surface Methodology (RSM) to maximize unconfined compressive strength. In the second stage of the study, the unconfined compressive strengths of the samples obtained by adding different amounts of 6 mm long polypropylene fiber reinforcement to the optimum amount of activator and binder were determined. Thus the reinforcement content that gives the maximum strength was obtained. In the third step of the study, soil samples were prepared considering optimum amounts of binder, activator, and reinforcement additives. The prepared samples were subjected to 5°C, 10°C, 20°C, and 30°C curing temperatures for 7 days and 28 days. The unconfined and triaxial compression tests were performed on the prepared samples. Thus, the effects of curing temperature on the parameters such as unconfined compressive strength, modulus of elasticity, cohesion, and internal friction angle were determined. As a result of the study, it was observed that the mechanical properties of the samples increased significantly with the increasing temperature up to the curing temperature of 20°C, and there was no great change in the mechanical properties above this temperature value.

Keywords: Deep mixing column, geopolymerization, response surface methodology, curing temperature, mechanical properties.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xi
BİRİNCİ BÖLÜM	1
Giriş	1
Derin Karıştırma Kolon Yöntemi	2
İKİNCİ BÖLÜM	6
Kaynak Özetleri.....	6
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	15
Materyal ve Metot	15
Uçucu Kül	15
Sodyum Hidroksit	16
Sodyum Metasilikat	16
Polipropilen Lif.....	16
Zeminin Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	18
Elek analizi.....	18
Kıvam limitleri	18
Standart kompaksiyon deneyi	19
Numune Hazırlama	20
Yanıt Yüzey Yöntemi ile Deney Tasarımı.....	21

Modelin Doğrulanması	25
Bağımsız Değişkenlerin Optimizasyonu.....	27
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	29
Araştırma Bulguları	29
Polipropilen Donatı Miktarının Dayanım Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi.....	29
Farklı Sıcaklıklarda Kürlenmiş Numunelerin Dayanım Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi	31
Üç Eksenli Basınç Deneyi Uygulama Aşamaları ve Sonuçları	34
XRD Analizi	37
Fourier Dönüştürümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR).....	39
BEŞİNCİ BÖLÜM.....	41
Sonuç ve Öneriler	41
KAYNAKÇA.....	42
ÖZGEÇMİŞ	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	:Numune kesit alanı (cm ²)
A₀	:Düzeltilmemiş Alan Değeri
A_f	:Düzeltilmiş Alan Değeri
Al₂O₃	:Alüminyum Oksit
Al₂O₃•2SiO₂•2H₂O	:Kaolinite
A_q	:Yeterli Hassasiyet Değeri
°C	:Derece Santigrat
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit, Portlandite
CaO	:Kalsiyum Oksit
CaCO₃	:Kalsit
CaSO₄	:Anhidrat (Gibsit)
Ca	:Kalsiyum
CH	:Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil
CL	:Düşük Plastisiteli İnorganik Kil
CSH	:Kalsiyum Silikat Hidrat
c	:Kohezyon
Cl	:Klor
cm	:Santimetre
cm²	:Santimetrekare
cm³	:Santimetreküp
CO₂	:Karbondioksit
CO₃	:Karbonat
dk	:Dakika
E	:Elastisite Modülü
Fe₂O₃	:Demir Oksit
g	:Yerçekimi İvmesi
H₂O	:Hidrojen Dioksit
ΔH	:Toplam Boy Kısalma

k	:Geçirimlilik katsayısı
kg	:Kilogram
kPa	:Kilopaskal (kN/m ²)
L	:Litre
ΔL	:Toplam Deformasyon Değeri
LL	:Likit Limit
m	:Metre
mm	:Milimetre
m³	:Metreküp
ml	:Mililitre
MgO	:Magnezyum Oksit
N	:Newton
NaOH	:Sodyum Hidroksit
Na₂O	:Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	:Sodyum Metasilikat
p	:Normal Gerilme
PI	:Plastisite İndisi
PL	:Plastik Limit
PP	:Polipropilen Lif
q	: Kayma Gerilmesi
S	:Doğal Zemin
SL	:Doğal Zemin, Kireç Karışımı
S/Ç	:Su/çimento Oranı
SiO₂	:Silisdioksit
SO₃	:Kükürt Trioksit
SO₄	:Sülfat
γ_{kmax}	:Maksimum Kuru Ağırlık
w	:Su İçeriği
w_{opt}	:Optimum Su İçeriği
X₁-X₂	:Aktivatör Miktarları
μ	:Mikro
φ	:İçsel Sürtünme Açısı

θ	:Derece
ρ_k	:Kuru Yoğunluk
ρ_{kmax}	:Maksimum Kuru Yoğunluk
%T	:Geçirgenlik

Kısaltmalar

AASHTO	:Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ANOVA	:Tek Yönlü Varyans Analizi
ASTM	:Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ASCE	:Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM D422-63	:Tane Boyu Dağılımı
CPT	:Koni Penetrasyon Deneyi
SPT	:Standart Penetrasyon Deneyi
CCD	:Merkezi Kompozit Tasarımı
D	:Arzu Edilebilirlik Değeri
DKY	:Derin Karıştırma Yöntemi
DKK	:Derin Karıştırma Kolonu
EDX	:Enerji Dağıtıcı X-Işını
FHWA	:Federal Karayolları İdaresi
RSM	:Yanıt Yüzey Yöntemi
SD	:Standart Değer
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskop
UCS	:Tek Eksenli Basınç
UCSC	:Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UK	:Uçucu Kül
XRD	:X-Işını Difraktometresi
YYY	:Yanıt Yüzey Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Zemin iyileştirme teknikleri (Uzuner, 2016)	2
Şekil 2. Derin karıştırma teknolojisi uygulama aşamaları (Kılıç, 2013)	3
Şekil 3. Uygulama Örnekleri (Kılıç, 2013).....	4
Şekil 4. Zeminin kompaksiyon grafiği.....	20
Şekil 5. Numune örneği ve tek eksenli basınç deneyi uygulaması	21
Şekil 6. Modelin doğrulanması	26
Şekil 7. Yanıt yüzey yöntemi optimizasyonu	27
Şekil 8. Polipropilen lif oranının serbest basınç dayanımına olan etkisi	30
Şekil 9. Polipropilen lif oranının kırılma anındaki birim kısalmaya etkisi.....	30
Şekil 10. Polipropilen oranının lif elastisite modülüne etkisi	31
Şekil 11. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın serbest basınç dayanımına etkisi.....	32
Şekil 12. 7 Günlük kür alan numunelerde sıcaklığın elastisite modülüne etkisi	32
Şekil 13. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın serbest basınç dayanımına etkisi.....	33
Şekil 14. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın elastisite modülüne etkisi.....	33
Şekil 15. Üç eksenli basınç deneyi uygulama aşamaları	34
Şekil 16. Mohr-Coulomb kırılma zarfı ve p-q diyagramı ile c ve ϕ 'nin belirlenmesi	34
Şekil 17. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın kohezyona etkisi	35
Şekil 18. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın içsel sürtünme açısına etkisi	36
Şekil 19. 28 Günlük Kür Sonucunda Sıcaklığın Kohezyona Etkisi.....	36
Şekil 20. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın içsel sürtünme açısına etkisi	37
Şekil 21. Zemin numunesi XRD analizi	38
Şekil 22. İyileştirilmiş zemin numunesi XRD analizi.....	38
Şekil 23. Zemin numunesinin FI-TR spektrumu	40
Şekil 24. İyileştirilmiş zemin numunesinin FI-TR spektrumu.....	40

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. <i>Uçucu Kül Kimyasal İçeriği (Alataş, 1996)</i>	15
Tablo 2. <i>Sodyum Silikat Kimyasal Solüsyon Özellikleri (Görhan, 2020)</i>	16
Tablo 3. <i>Karışımında Kullanılan Polimer Lif Özellikleri</i>	17
Tablo 4. <i>Kıvam Limitleri Değerleri</i>	19
Tablo 5. <i>Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkez Değerleri</i>	22
Tablo 6. <i>Deneyisel Tasarım Matrisi</i>	23
Tablo 7. <i>ANOVA Sonucu</i>	25



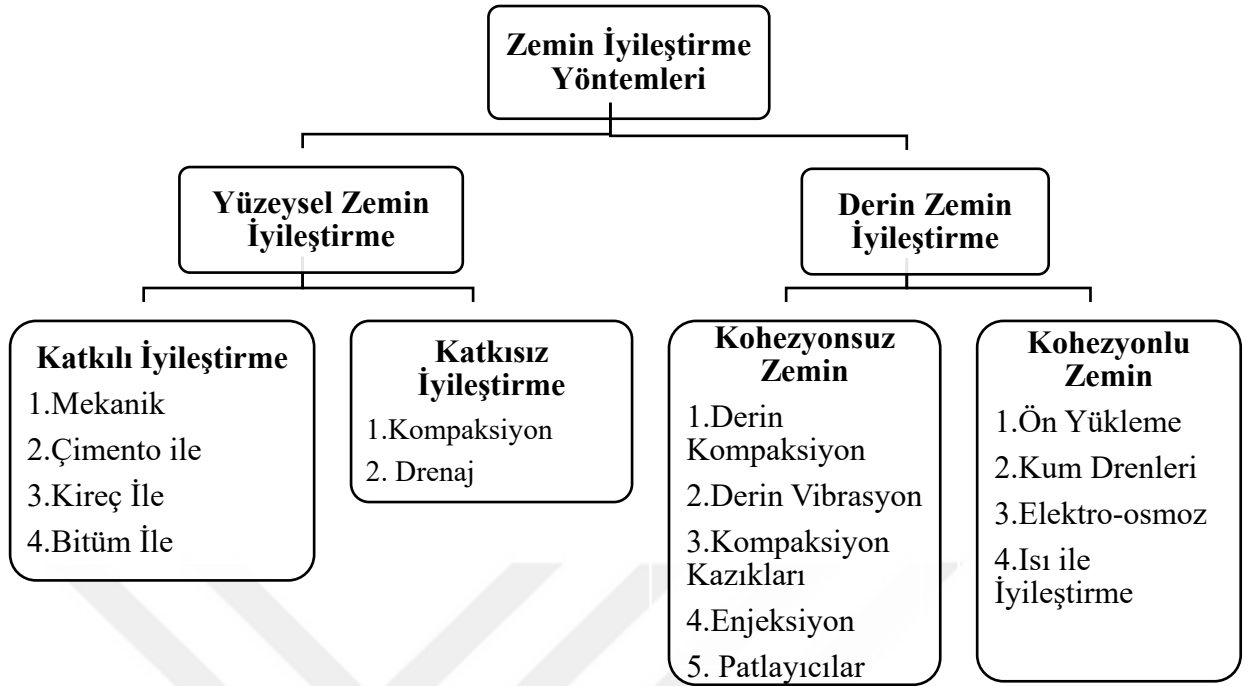
BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Geoteknik mühendisliğinde zemin kavramı, kayaç döngüsü ile meydana gelen zayıf kaynaşık veya kaynaşmamış olma özelliğine sahip mineral tanelerinden oluşmuş birikintiler şeklinde tanımlanabilir. Zemin taneleri arasındaki boşluklar sıvı veya hava içermektedir. Kayaç döngüsünün devam ettiği tarihsel süreçler boyunca, bu döngünün bir parçası olarak kaya tiplerinin biyolojik, fiziksel ve kimyasal aşınması, birikmesi ve yer değiştirmesi ile zeminler meydana gelmiştir. Zemin mühendislik yapılarındaki taşıyıcı sistemin ve inşaat malzemelerinin en temel yapı taşıını oluşturmaktadır. Zeminler su muhtevası, basınç, yükleme, sıklık derecesi ve drenaj koşulları gibi birbirinden farklı özellikler gösterdiklerinden dolayı zemin sınıfı geniş bir aralığı kapsamaktadır. İnşa edilecek yapının temel zemini her zaman istenilen özellikleri sağlayamayabilir. Bu gibi durumlarda zeminin mühendislik özelliği yüksek başka bir malzeme ile ikame edilmesi ya da yapılacak alanın değiştirilmesi gibi ekonomik olmayan çözümler genel olarak çözümler sunulabilir. Bunların yanı sıra doğal zeminin özelliklerinin bilinmesi ve zeminden kaynaklanan problemleri bertaraf edecek yöntemlerin belirlenmesi yoluna başvurulabilir. Stabilize edilmiş zeminde oluşacak mukavemet artışı, zeminin geçirimsiz hale gelmesi gibi durumlar büyük önem taşımaktadır.

Zeminlerin geçirimsizlik özelliği, direnç parametreleri, taşıma gücü, stabilitesi mühendislik amaçlı çalışmalarda dikkat edilen parametrelerdir. Bu parametreleri belirlemek için arazi çalışmalarına ve laboratuvar deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapı yüklerine ve problemleri zemin tabaka kalınlıklarına bağlı olarak değişen farklı zemin iyileştirme yöntemleri vardır.

Zemin iyileştirme derin stabilizasyon ve yüzeysel stabilizasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemi, derin zemin iyileştirme yöntemine ihtiyaç duyulmadığı durumlarda uygulanmaktadır. Yüzeysel zemin iyileştirme genelde karayolu, demiryolu gibi mühendisliğin kollarından biri olan ulaşım mühendisliği bölümünde ve üst yapı yükünün çok fazla olmadığı yapılarda kullanılmaktadır. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemine örnek olarak drenaj ve kompaksiyon gösterilebilir.



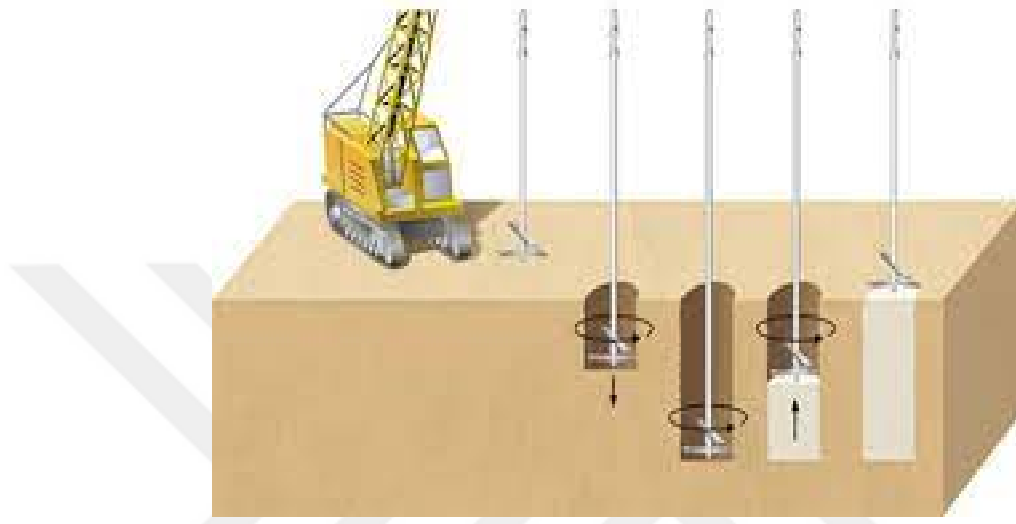
Şekil 1. Zemin iyileştirme teknikleri (Uzuner, 2016)

Zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 1’de verilmiştir. Uygulama şekillerine göre hidrolik, mekanik, biyoteknik, fiziksel, kimyasal ve donatılandırma gibi farklı tipleri olan stabilizasyon yöntemlerinde uygulandığı zemin tipine ve uygulama alanlarına göre farklılık göstermektedir.

Derin Karıştırma Kolon Yöntemi

Derin karıştırma yöntemi 1960’dan itibaren dünyada, 2006 yılından itibaren ise TS-EN14679 numarası ile ülkemizde uygulanmaya başlanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Geleneksel bağlayıcı katkı maddeleri ile zeminin yerinde karıştırılması esasına dayanan en etkili zemin iyileştirme metotlarından biridir. Derin karıştırma kolon yöntemi uygulama aşamaları şematik bir halde Şekil 2’de gösterilmiştir. Derin karıştırma kolon teknolojisine etki eden bazı faktörler vardır. Kullanılan geleneksel bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel yapısı, zeminde değişen sıcaklık etkisi, yerel zemin koşulları vb. durumlar bu yöntemde etkili olmaktadır. Geleneksel bağlayıcılara alçı, kil, hava kireci, doğal veya yapay puzolanlar, 18. yüzyılın ortalarından sonra üretilen doğal ve yapay hidrolik kireçler ile erken priz alan çimentolardır. Kireç ve kireç esaslı bağlayıcılardan yapılan geleneksel harçların kimyasal yapısı, gözeneklilik yüzdesi yaklaşık %20-40’tır ve boşluk boyutu dağılımında makro boşluk yüzdesi daha yüksektir. Malzemelerin dağılımında makro boşluk boyutu hâkim olduğundan,

kuruma ve su emme işlemi diğerlerinden daha hızlıdır. Makro boşlukların fazlalığı harcın tuz kristalleşme döngülerinden ve suda çözünen tuzların hidratlaşma ve dehidratlaşma hareketlerinden ortaya çıkan iç gerilmelere karşı da malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Özetlenecek olursa bir malzemenin boşluk oranı arttıkça basınç dayanımı ters orantılı olarak azalmaktadır.



Şekil 2. Derin karıştırma teknolojisi uygulama aşamaları (Kılıç, 2013)

Derin karıştırma kolon teknolojisini etkileyen bir diğer faktör ise mevsimsel sıcaklık değişimidir. Çeşitli kaynaklara bakıldığında yüzeysel stabilizasyonda ortalama sıcaklık değeri 4°C ve 10°C olmasına karşın derin karıştırma zemin iyileştirme yönteminde zeminin yüzeyinde ve derinliğinde sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır. Zemin derinleştikçe ortam sıcaklığının sabit kaldığı ortaya konmuştur. Bu durumun nedeni olarak da ortalama yıllık sıcaklık, zeminin termal iletkenlik katsayısı, maksimum yıllık sıcaklık değerinin ortalama sıcaklık değerinden farkı, mevsim gibi parametreler olduğu bilinmektedir. Ancak bu durumun oluşturulan derin karıştırma kolonları üzerindeki etkisi henüz bilinmemektedir. Bu çalışmada laboratuvar ortamında oluşturulan ve farklı sıcaklıklarda kürlenmiş derin karıştırma kolon numunelerinin dayanım üzerindeki etkisi incelenecektir.

Olumsuz zemin koşulları için başvurulmuş derin karıştırma kolon teknolojisi kireç, çimento veya puzolanik bağlayıcı malzemelerin mekanik yöntemler yardımıyla zemin ile karıştırılması olarak özetlenebilir. Uygulama aşamasında ilk olarak delici alet girilen kolon koordinatları yardımıyla pozisyon alır. Daha sonrasında istenilen tasarım derinliğine indirilen karıştırıcı şaft zemini karıştırarak yukarıya çekilir. Tasarım derinliğe inilirken ya da şaftın geri çekilme aşamasında veya her iki aşamada da bağlayıcı maddeden oluşan şerbet verilerek zemin

ile bu maddelerin karışması sağlanır. Derin karıştırma yönteminde yerinde kolon oluşturulabilmesi için gerekli donanımlar karıştırıcı şaft, su tankı, çimento tankı ve mikserdir. Hidrolik ayırma duvarlar, kazı destek duvarları, rıhtım yapıları, saha betonları, metro ve tünel yapılarının zemin desteğinde, endüstri tesisleri derin karıştırma yönteminin uygulanabildiği alanlardır. Yapılan uygulamalarda derin karıştırma kolon sisteminin yanal basıncı düşük seviyelere indirgediği gözlemlenmiştir. Zeminin mukavemetindeki artış ve zeminin boşluklu yapısındaki azalma derin karıştırma kolon teknolojisinin uygulama alanlarını daha çok genişletmiştir. Uygulama alanlarından biri olan kazı destek duvarlarında kazı yüzeylerinde yüksek dayanım ve stabil bir zemin yüzeyi elde etmek, zemin sıkılığını artırmak, yeraltı suyunun geçişinin kontrolünü sağlamak için tercih edilmektedir. Başka bir uygulama alanı olarak metro, tünel gibi yeraltı inşaatları için zemin hareketlerini kontrol altına aldığı gözlemlenmiştir. Bu yöntem ayrıca sıvılaşmaya karşı zeminin dayanımını arttırmak ve boşluk suyu basıncının azaltılması, sıvılaşmanın engellenmesi amaçları için uygulanmaktadır. Derin karıştırma kolon yöntemi uygulamalarıyla ilgili birkaç örnek Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Uygulama Örnekleri (Kılıç, 2013)

Derin zemin karıştırma genel itibariyle iki yöntemle uygulanmaktadır. Bunlar:

- Islak yöntem
- Kuru yöntem

Islak Yöntem, su ve bağlayıcı malzemenin belli oranlarda karıştırılıp zemine enjekte edilmesi ile oluşmaktadır. Bu yöntem siltler, killeri ve düşük su içeriğine sahip ince daneli kumlar için daha uygundur. Kuru yöntemin uygulama farkı zeminlerin su seviyesinin altında veya suya doymun olduğu durumlarda katkı malzemesinin ıslak zemine enjekte edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu yöntem daha çok yüksek nem içeriğine sahip yumuşak zeminlerde uygulanmaktadır

Zeminin ısı kapasitesi, toprak sıcaklığını bir derece yükseltmek için gereken ısı enerjisi miktarını belirler. Zeminin su içeriği ve termal iletkenlik arasında doğru orantı vardır. Havanın termal iletkenliği diğer malzemelerin termal iletkenliğinden çok daha az olduğu göz önüne alındığında, ısı yalnızca kuru ortamlarda toprak parçacıkları arasındaki temas bölgeleri aracılığıyla gösterilir.

Polimerler, birbirine kimyasal bağlarla bağlanan basit moleküllerden meydana gelen monomer adı verilen yüksek moleküler ağırlıklı maddelerdir. Cam ve karbon gibi lif katkılı plastik malzemeler yüksek mekanik ve fiziksel özellikler içermektedir. Katkılı plastikler özellikle içten yanmalı motorların ve uçakların imalatında kullanılmaktadır. Yüksek termal ve elektriksel özelliklere ve yeterli mekanik özelliklere sahiptirler. Geopolimerler ise mineral polimer esaslı çimentolardır. Termik santrallerden çıkan baca külüne sodyum hidroksit ve sodyum silikat ilavesi ile elde edilir. En az portland çimentosu kadar sağlamdır ve daha çevreci üretim tekniği vardır. Metakaolin gibi kimyasal aktif minerallerin alkali veya asidik ajanlarla polimerleştirilmesi esasına dayanır. Kaolinit ve metakaolin gibi çeşitli alüminosilikat kaynaklarından elde edilen geopolimerlerin ana malzemeleri kireç cürufu, uçucu kül, endüstriyel uçucu kül, kildir. Geopolimer öncülleri, dehidroksite killeri, seramik hammaddeleri ve kırıntı bazlı malzemeler çeşitli endüstriyel ve tarımsal yan ürünler olabilir. Alkali çözünmesini ve geopolimer oluşumunu kolaylaştırmak için amorf formda bünyelerinde büyük miktarlarda alüminyum veya silikon barındırmaları gerekmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri

Bu bölümde literatür araştırması yapılmış olup, literatürde yapılan çalışmalarla ilgili bilgiler sunulmaktadır.

Taki (2004) derin karıştırma kolonların uygulanan yöntemler ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. Taki derin karıştırma yöntemlerinde iki farklı metoda odaklanmıştır. Bunlardan biri kesme diski karıştırma yöntemi, bir diğeri ise çimento derin karıştırma yöntemidir. Bu iki yöntemi Japonya ve ABD olmak üzere iki farklı bölgede uygulamıştır. Çimento derin karıştırma yöntemini ABD’de zemin stabilizasyon projesinde kullanırken, kesme diski karıştırma yöntemini Japonya’da temel altı zemin stabilizasyonu projesinde kullanmıştır. Her projede yerinde oluşturulan derin karıştırma kolonlarından karot numuneleri almış ve bu numuneleri tek eksenli basınç deneyine tabi tutmuştur. İstatistiksel analizlerini yaptığı numunelerin sonuçlarını yorumlayarak çimento karışımının homojen olmamasının dayanımı etkileyeceği kanısına varmıştır. Düşük homojenlik gösteren çimento-zemin karışımlarının düşük kaliteye sahip olduğunu gözlemlemiştir.

Kwan, Bouazza, Fletcher ve Ranjith (2005) çalışma kapsamında CH kilinin oturma ve mukavemet özelliklerini iyileştirmek için 3 farklı türde katkı kullanmıştır. Çimento, çimento-granül öğütülmüş cüruf, çimento- uçucu kül karışımlarını kullanmıştır. Farklı oranlarda kullanarak numuneler üretmiştir. CH kilinin çimento, çimento-cüruf, çimento- uçucu kül katkılarıyla beklenen sıkıştırılabilirlik ve dayanım açısından büyük ölçüde stabilize edildiği kanısına varmıştır. Zemindeki boşluk oranının çimento bağlayıcı oranını etkilediğini gözlemlemiştir. Ayrıca düşük çimento/bağlayıcı oranının düşük boşluk oranına neden olduğunu ileri sürmüştür. Diğer bir etken olan su/çimento oranındaki çimento oranının en az %15 seviyesindeki oranın önemli iyileştirme yaptığını ortaya koymuştur.

Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğınobalı (2009) çalışmasında şişen zemini C ve F tipi uçucu kül ile birlikte kum ilave ederek iyileştirmeyi amaçlamıştır. Şişme basıncı deneyi yapılan numunelerin şişme yüzdelere bakmıştır. Uçucu kül katkılı numunelerin şişme basıncı ve şişme yüzdesinde azalma olduğunu gözlemlemiş, kum oranının uçucu kül oranından fazla olduğu numunelerde azalmanın devam ettiğini ortaya koymuştur. 28 günlük kür sonuçlarında %10 kum ve %15 C tipi oranına sahip numunelerin en yüksek dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir.

Yaprak ve Karacı (2009) çalışması kapsamında polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarının yapay ağları ile tahmini konusunu araştırmıştır. Çalışmasında lif katkısız ve üç farklı oranda (0,9, 1,35, 1,8 kg/m³) beton numuneleri üretmiş ve 28 gün laboratuvar koşullarına maruz bırakmıştır. 28. günün sonunda 20, 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklıklara çıktığını gözlemlemiştir. Bu aşamada Neural Network kullanarak elde ettiği verilerin aynı sonuçları vermesini amaçlamıştır. Laboratuvar testleri ve sinir ağı uygulamalarından elde ettiği verileri karşılaştırdığında değerlerin çok yakın olduğu kanaatine varmıştır.

Türköz, Savaş ve Tosun (2010) çalışmalarında problemli kil zemini magnezyum klorür solüsyonu ile iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında şişme potansiyeline sahip killi zemini standart kompaksiyon deneyi yardımıyla farklı oranlarda (%0, %1, %3, %5, %7, %10) magnezyum klorür kullanarak numuneler stabilize etmeye çalışmışlardır. Deneyler sonunda %7 katkı kullanılan zemin numunesinin daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Ceylan (2011) çalışmasında zemin iyileştirme metotlarına yer vermiştir. Ağırlık olarak derin karıştırma yöntemlerine değinen Ceylan çalışmasında Türkiye’de en çok uygulanan dinamik kompaksiyon ve jet grout metotlarını incelemiştir. Dinamik kompaksiyon uygulama örneği olarak soğuk haddehane tesisini ve sac servis merkezini incelemiştir. Jet grout uygulama örneğini ise galvaniz kaplama ve boyahane merkezini seçip değerlendirmiştir.

Sengör (2011) doktora çalışmasında farklı kür sürelerine (7, 28, 90, 365 gün) tabi tuttuğu iyileştirilmiş zemin numunelerini üzerinde tek eksenli basınç deneyi uygulayarak yumuşak killi zeminler için en uygun karışım tipi ve karışım oranlarını araştırmıştır. Araştırmanın diğer safhasında ise konsolidasyon tankları içerisinde üç tip karışım oranında ve dört farklı yerleşiminde DKK numuneleri oluşturmuş, bu yöntem ile stabilize edilmiş zeminin konsolidasyon özelliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak derin karıştırma kolon yöntemi ile konsolide edilen zeminin farklı parametrelere bağlı olduğunu bu parametrelerin; kolon parametrelerinin etkili alan oranına ve karışım malzeme miktarının kilin sıkışma özelliklerine etki ettiğini ortaya koymuştur.

Yılmaz (2016) çalışmasında farklı oranlarda uçucu kül atığı kullanarak (%0, %5, %10, %15, %20, %25, %30) düşük plastisiteli kil üzerindeki dayanım etkisini araştırmıştır. Oluşturduğu numuneleri tek eksenli serbest basınç dayanımına tabi tutmuştur. Sonuçlar ışığında yüksek plastisiteli kil ve uçucu kül karışımında en yüksek dayanımı %25 oranındaki katkılı numunenin verdiğini ortaya koymuştur.

Fidan (2016) çalışmasında doğal puzolanik katkı maddesi inceliğinin killerin stabilizasyonunda dayanım ve durabiliteye olan etkisini incelemiştir. Düşük plastisiteli killi zemine % 6'lık kireç katan Fidan, ayrıca doğal ve ince öğütülmüş olmak üzere iki farklı tip %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında perlit katmıştır. Hazırladığı zemin numunelerinin şişme, dayanım ve durabilite özelliklerini belirleyen Fidan ince öğütülmüş perlitin dayanım ve durabiliteyi olumlu yönde etkilediğini, inceltilmiş düşük perlit oranı ve inceltilmiş yüksek perlit oranı ile karşılaştırıldığında ise düşük perlit kullanılan zemin numunelerinde yüksek mukavemet değerleri elde edildiği kanısına varmıştır.

Topçu, Demirel ve Uygunoğlu (2017) çalışması kapsamında dört farklı oranda polimer esaslı polipropilen lifin harç özelliklerine etkisini araştırmıştır. Lifler harca sırasıyla %0, %0,6, %0,8, %0,9 ve %1,1 oranlarında katılmış olup oluşturduğu numunelere basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases hızı, su emme, dinamik elastisite modülü ve mikroyapı incelemeleri yapmıştır. Deneylerde harçlar üzerinde basınç dayanımında bir miktar düşüş olduğu, eğilme dayanımında bir miktar artış olduğu, su emmelerinin kullanılan lif tipine göre değiştiği ve elastisite modülünün de düştüğü sonucuna varmıştır.

Balcı (2018) çalışması kapsamında çimento yerine uçucu kül kullanmış olup endüstriyel zemin tasarımı yaparak ihtiyaç duyulacak zemin kalınlığı ve zeminlerin çevresel etkilerini araştırmıştır. Hazırladığı numuneler için malzeme miktarlarını dikkate alarak çevresel ve ekonomik açıdan uygunluğunu incelemiştir. Yaptığı incelemeler ve deneyler sonucunda çimentonun farklı ve yüksek oranlarda katılan uçucu kül ile daha çevreci ve ekonomik beton tasarlamanın mümkün olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Mohabbi Yadollahi ve Varolgüneş (2018) çalışması kapsamında kullanımı oldukça artmakta olan normal portland çimentosunu ele almıştır. Çalışmasında bağlayıcıların, alkali sıvının uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü gibi alümino-silikat materyalleri ile polimerik reaksiyonu ile üretebileceği yeni bir yol önerilen bir çalışmadan esinlenmiştir. Geopolimer kaya bazlı agregalarla kuvvetli bir kimyasal bağ oluşturma yeteneği de göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmasında kullanılan malzemenin eğilme-basınç mukavemeti yüksek alternatif bağlayıcılar geliştirmek ve daha çevreci bir malzeme üretimi için perlit tabanlı geopolimerin mekanik davranışına polipropilen liflerin etkisini göz önüne çıkarmayı amaçlamıştır.

Özen (2018) çalışmasında yerinde uygulama esasına dayanan geoteknik zemin iyileştirme yöntemlerini incelemiştir. Yeraltı suyuna sahip ve boşluklu zemin yapısının mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının doldurulması ve mevcut yapının güçlendirilmesini esas

almıştır. Çalışmaya konu olan zeminin geoteknik analizlerini yapmış, yük kabulleri, deprem yükü altındaki kazıklı temellerin dinamik analizini ve ankraj kökü taşıma kapasitesi hesabının değerlendirmesini yapmıştır. Plaxis programında modellediğinde zayıf zemin şartlarındaki kazık tasarımlarında zemin üzerindeki deformasyon davranışına etkilerini incelemiştir.

Ranjbar ve Ghadir (2018) çalışmasında polipropilen lifin geopolimerlerle birleşmesi sonucunda erken yaşlarda işlenebilirliğe olan katkısını araştırmıştır. Eklenmesi halinde işlenebilirliğin azalacağını ve erken mukavemet gelişimi için uygun olmadığını gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra enerji içeriğini ve malzeme tokluğunu geliştirdiğini ortaya koymuştur.

Masike (2019) çalışmasında derin karıştırma kolon numunelerine silis dumanı ilave ederek numunelerin üç eksenli basınç dayanımı ve konsolidasyon özelliklerini incelemiştir. Çalışmasında çimento, akışkanlaştırıcı ve silis dumanı gibi birçok öncül kullanan Masike yanıt yüzey yönteminden faydalanmıştır. Çimento miktarı için %5-20 sınır değerlerini kullanan Masike, silis dumanı miktarı içinse %0-15 sınır değerlerini kullanmıştır. Bağlayıcı oranının %0-%5'i kadar ise akışkanlaştırıcı miktarı seçmiştir. 7, 28 ve 56 gün kür alan derin karıştırma kolon numunelerini üç eksenli basınç dayanımı ve konsolidasyon deneylerine tabi tutmuştur. Çalışma sonunda derin karıştırma kolon numunelerinde akışkanlaştırıcının mukavemet değerleri üzerinde çok etkili olmadığını ancak belirlenen su/bağlayıcı oranının ve silis dumanı miktarının dayanıma akışkanlaştırıcının aksine mukavemet değerlerinde gözle görülebilir bir artış meydana getirdiğini ortaya koymuştur.

Wahidy (2019) bu çalışmada killi zemine farklı tiplerde çimento ekleyerek derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan kolonlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmasında puzolan katkılı çimento, yüksek fırın cürufu çimento, ince taneli portland çimentosu ve normal portland çimentosu olmak üzere dört farklı çimento türü kullanmıştır. Zeminin ve çimentonun reolojik özelliklerini belirlemek için mars hunisi, vicat iğnesi ve sedimentasyon deneylerini yapmıştır. S/Ç oranı deneyler sonucunda 0,9 olarak seçmiştir. Her çimento türü için zeminin kuru ağırlığının %6, %9, %12 ve %15'i olacak şekilde derin karıştırma kolonları oluşturmuştur. 7 gün, 14 gün ve 28 günlük kürde bekletilen numuneler serbest basınç ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda ise dayanım her çimento türü için farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. DKK numunelerinde kür süresi ve çimento oranı arttıkça mukavemet değerlerinde artış olduğunu gözlemlemiştir.

Aksoy ve İçen (2020) çalışmalarında homojen kum zeminlerin optimum iyileştirme derinliğinin deneysel olarak belirlenmesi üzerinde durmuşlardır. Yapılan çalışmada deneyler yardımıyla, farklı derinliklerde stabilize edilmiş zemine oturan temellerin taşıma gücünü

hesaplamışlardır. Yapılan hesaplamalarda gevşek ve orta sıkılıktaki kumlu zemine taşıma gücü açısından yetersiz zeminleri ve temeli modellemek amacıyla çelikten imal edilmiş bir sürekli temel tercih etmişlerdir. Çalışma sonunda ise iyileştirme derinliğin artması ile taşıma gücünde büyük artışlar meydana geldiği ayrıca sıkı zeminlerde yapılacak yüzeysel stabilizasyonun taşıma gücü değerlerine büyük oranda etki ettiğini ortaya koymuşlardır.

Şahbaz (2020) çalışması kapsamında düşük plastisiteli kille çalışmıştır. Çalıştığı zemine %5, %10 oranlarında çimento ve %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında polipropilen lif katarak deney numuneleri hazırlamıştır. Bu karışımların optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını kompaksiyon deneyi ile belirlemiş olup optimum su muhtevalarına göre hazırladığı numunelere serbest basınç deneyleri, CBR Kaliforniya taşıma gücü deneyleri ve şişme deneylerine tabi tutmuştur. 1 gün, 7 gün ve 28 gün kürlemeye tabi tuttuğu numunelerin deneylerinden çıkardığı sonuç ise doğal zemine katılan katkı malzemelerin zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiğidir. Fakat polipropilen lif için aynı sonuca varmadığını aksine polipropilen lifin zemin içinde topaklanmaya sebep olduğu ve bu nedenle serbest basınç dayanımını bir miktar düşürdüğünü görmüştür.

Ural, Kut ve Gülsevinç (2020) çalışmalarında atık PVC ile zemin stabilizasyonunu amaçlamışlardır. Çalışmalarında killi zemine %10 oranında çimento ekleyen Ural ve arkadaşları %5, %10 ve %15 oranlarında atık PVC fiberleri 0 gün ve 28 gün küre tabi tutmuşlardır. Kür alan numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapmışlardır. Çalışma sonucunda atık PVC fiberlerinin killi zeminin dayanım mukavemetinde etkili olduğu kanısına varmışlardır.

Dağlı ve Çapar (2021) tarafından yapılan çalışmada killi zemini uçucu kül ile stabilize edilmiş, zeminin dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yüksek (B) ve düşük (S) plastisiteli olmak üzere iki zemin seçmiş ve bunların içerisine F sınıfı uçucu kül ve kireç katarak dayanım ve durabilite özellikleri incelemiştir. İlk olarak zeminlere farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %30) uçucu kül ile karıştırmış daha sonra ise aynı zeminlere farklı oranlarda (%3, %5, %7) sadece kireç ilavesi yapılmıştır. Hem uçucu kül hem kireç etkisini görebilmek için %30 sabit tutulan uçucu külün yanı sıra zemine %3, %5, %7 oranlarında kireç ilavesi yapmıştır. Hazırlanan numuneleri 7 gün ve 28 gün kür sürelerine tabi tutulmuştur. Numuneler üzerinde donma-çözünme, serbest basınç deneyi, lineer şişme deneyi ve dolaylı çekme deneyi uygulamıştır. Araştırma sonuçlarına göre yüksek ve düşük plastisiteli killerin üzerine F sınıfı uçucu kül eklendiğinde numunelerin istenilen özellikleri sağlamadığını ortaya konmuştur. Uçucu kül ve kireç eklenen numunelerin ise sadece uçucu kül ve kireç eklenen numuneler göre daha yüksek dayanım gösterdiğinin sonucuna varmıştır.

Danishyar (2021) çalışması kapsamında uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri araştırmış olup farklı oranlarda polipropilen lif katarak hazırladığı karışımlardaki uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit ve farklı silikat modülü değerlerine sahip sodyum silikat solüsyonları ile aktive etmiş ve geopolimer kompozit örnekler elde etmiştir. Oda sıcaklığında 7 gün beklettiği örneklerin ağırlıkça su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özelliklerini belirlemiştir. Ardından örneklerin eğilme ve basınç dayanım değerleri belirlemiştir. Sonuç olarak elde ettiği bulguları değerlendirdiğinde %1,5 polipropilen lif ilaveli geopolimer kompozit harçlarının daha iyi dayanıklılık özelliklerine sahip oldukları sonucuna varmıştır.

Kamiloğlu ve Turan (2021) çalışmalarında farklı kür sıcaklıklarında kireçle stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi bir zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin yanıt yüzey yöntemiyle tahmini üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında 40 adet zemin numunesini 3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C, 43 °C sıcaklıklarda 28 gün boyunca küre tabi tutmuşlardır. Kür alan zemin numuneleri üzerinde üç eksenli basınç ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel tasarım, test sayısını azaltmak için yanıt yüzey yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 18 adet numunenin deviatör dayanımları dikkate alınmıştır. Sonuç olarak ise kayma mukavemeti ve serbest basınç dayanımlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için yanıt yüzey yöntemi ile daha az sayıda deney sonucu kullanılarak mümkün olduğu ortaya konmuştur.

Kaptan, Çınar ve Bozbey (2021) çalışmalarında derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminlerde elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkinin incelenmesi üzerinde durmuşlardır. Literatürde bulunan derin karıştırma kolonları ile ilgili 12 çalışmadan veriler toplayıp bu verilerin mukavemet-modül değerlerini bir araya getirmişlerdir. Bu veri tabanı yapılan çalışmalarda kullanılan katkı tipi, zemin türü içermekle beraber yapılan çalışmalardan elde edilen serbest basınç dayanım değerleri ve elastisite modül bilgilerini de içermektedir. Veri tabanında faydalanılarak yeni korelasyonlar sunan Kaptan ve arkadaşları bu yeni korelasyonların derin karıştırma kolon uygulamaları için faydalı olacağı kanısına varmışlardır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre ise turba ve organik zeminler için modül değerlerinin 160 MPa ve altında kaldığını ve çimento-kireç katkılı numunelerin sadece çimentonun kullanıldığı numunelere göre daha küçük modül değerlerine ulaştığını ortaya koymuşlardır.

Küçük (2021) çalışma kapsamında polipropilen lif kullanarak killi zeminin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Geosentetik malzeme sınıfına giren polipropilen lifleri optimum su muhtevası bulunan doğal zemine farklı oranlarda (%0,5, %1, %1,5, %2)

katarak zemin-lif karışımı numuneler oluşturmuştur. Serbest basınç deneyine tabi tuttuğu numunelerin mikro yapısını ve mikroskopik görüntüleri arasındaki ilişkiyi incelemek için SEM ile analiz etmiştir. Deney sonuçlarını incelediğinde yüksek dirence sahip polipropilen fiberlerin boyutları ve uzunluğunun dayanımı etkilediği ve zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini sonucuna varmıştır.

Najim (2021) çalışması kapsamında polipropilen liflerin ve diatomitin 750°C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz kalmış cürufu jeopolimer harçların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak cürufu esaslı jeopolimer harçların işlenebilirliğinin diatomit içeriğinin artışıyla ters orantılı olarak azaldığını ayrıca %1 polipropilen lif katkısının fark etmeksizin bütün jeopolimer harçların işlenebilirliğini azalttığını göstermiştir. Polipropilen lif katkısı, jeopolimer bileşenleri ile agregalar arasındaki bağı güçlendirdiğinden, oda sıcaklığında jeopolimer harçların çekme gerilmelerini, deformasyon kapasitelerini ve eğilme özelliklerini iyileştirmiştir. Jeopolimer harç numuneleri yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra elde edilen veriler diatomit içeren numunelerin %100 dere kumu içeren numunelerden daha düşük dayanım kaybına ve daha iyi termal dayanıma sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Öztürk Yarar (2021) çalışması kapsamında ince agregalar ve polipropilen lifler olarak taban külü içeren köpük betonun özelliklerinin incelenmesini amaçlamış olup ek olarak köpük betonun özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisini de araştırmıştır. Yüksek sıcaklık altında, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun kütle kaybında azalma ve basınç ve eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Sonucunda ise ince agregalar ve polipropilen lifler olarak taban külü katkılı tüm köpük beton karışımlarının orta mukavemetli beton olarak kullanılabileceğini görmüştür.

Rasool (2022) çalışması kapsamında bir jeopolimer kompozitte geri dönüştürülmüş kırıntı atık lastiğin kullanımının uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmış olup uçucu kül ve doğal nehir kumu ile bir karışım hazırlamıştır. Hazırladığı bu karışım mekanik ve termal özellikleri üzerinde çalışmıştır. Sonuç olarak üretilen yeni kompozitin karbon ayak izini önemli ölçüde azalttığını; çok daha uygun maliyetli ve daha çevre dostu bir malzeme olarak kullanılabileceği kanaatine varmıştır.

Bıçakçı (2022) çalışmasında killi zemini kireç ile stabilize etmiştir. Kilin optimum su muhtevası oranı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirleyen Bıçakçı bu verilere göre zemin karışımına %3, %6, %9 ve %12 oranında kireç katkısı kullanmıştır. 7 gün, 14 gün, 28 gün ve 90 gün küre bıraktığı zemin numunelerini kür süresinin sonunda tek eksenli basınç

deneyine tabi tutmuştur. Çalışma sonucunda %9 kireç kullanılan zemin numunelerinin en yüksek dayanımı verdiğini gözlemlemiştir. Ayrıca kür süresi ve dayanımın doğru orantılı ilerlediğini kür süresinin artmasının dayanımı arttırdığını ortaya koymuştur.

Gençoğlu (2022) çalışması kapsamında kimyasal zemin stabilizasyonunda inceliğin etkisini üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada hazırlanan numunelere kıvam limitleri, kompaksiyon, CBR ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. CBR ve dayanım değerleri üzerinde çok yüksek artışlar meydana geldiğini gözlemlemiş olup yüksek plastisiteli kil bir zeminde daha ince uçucu kül katkısıyla daha yüksek CBR ve dayanım değerlerine ulaşılabilirliğinin kanısına varmıştır.

Soysal (2022) çalışmasında zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan derin zemin karıştırma yöntemi ile imal edilen kolonların taşıma gücünü belirlemek amacıyla, sahada yükleme testleri yapılmış veriler değerlendirilmiştir. Bu kapsamda beş farklı proje içindeki toplam 6 adet yapıya ait tam ölçekli yükleme testlerinden elde edilen yük-oturma değerleri, literatüre geçmiş taşıma gücü belirleme yöntemleri ile grafiksel olarak belirlenmiştir. Ardından derin temeller için hesaplanan taşıma gücü hesaplama yöntemleri ile her bir projeye ait kolon taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca projelere ait geoteknik değerlendirme raporlarında verilen taşıma gücü değerleri ile diğer sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Yükleme deneylerinin sonuçlarının yorumlanmasında sıkça kullanılan üç yöntem kullanılmıştır. Yük artışı ile deformasyonlar arasındaki ilişkiden yola çıkılarak yapılan hesaplamalarda yöntemler arasında uyumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Uçar (2022) çalışması kapsamında iki farklı lif ve farklı su/çimento oranıyla farklı gradasyonlar kullanarak ürettiği betonların basınç, eğilme mukavemeti ile enerji yutma kapasitelerinin optimizasyonunu amaçlamıştır. Yaptığı deneylerden elde ettiği sonuçlara göre, betona yalnız Sika Fiber 12 katılması durumunda 50,14 MPa'lık bir basınç ve 9,81 MPa'lık eğilme mukavemeti elde etmiş olup bu değerler kontrol betonuyla karşılaştırıldığında ise basınç ve eğilme mukavemetindeki artış oranları sırasıyla %4 ve %9,2 olmuştur. Betona sadece Polimono 18 lif katması durumunda ise 49,78 MPa'lık basınç ve 9,52 MPa'lık eğilme mukavemetlerini elde etmişti bu değerleri kontrol betonuyla karşılaştırıldığında ise basınç ve eğilme mukavemetindeki artış oranları sırasıyla %3,3 ve %7,3 olmuştur. Her iki lifin hibrit olarak kullanılması durumunda ise 51,77 MPa'lık basınç ve 11,51 MPa'lık eğilme mukavemetini elde etmiş olup bu değerlere göre basınç mukavemeti kontrol betonuna göre yaklaşık olarak %7,4 ve eğilme mukavemetinde ise %42 oranında arttığını gözlemlemiştir. Lif oranının artmasıyla enerji yutma kapasitesi normal betona göre %174,818 oranında arttığı sonucuna varmıştır.

Yıldız (2022) çalışması kapsamında derin karıştırma kolonları ile güçlendirilmiş otoyol dolgusunun iki ve üç boyutlu analizleri üzerinde çalışmıştır. Analizlerde metot 1 (İki Boyutlu Eksenel Simetrik Model), Metot 2 (Basitleştirilmiş Düzlem Deformasyon Modelleri) ve üç boyutlu model kullanmıştır. Üç boyutlu modelin analizinde Midas 3D sonlu elemanlar programını kullanırken iki boyutlu modellerin analizinde Plaxis 2D programını kullanmıştır. Kullanılan bu modellerden elde ettiği aşırı boşluk suyu basıncı ve deplasman, referans olarak aldığı çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırmış ve uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Çalışma sonucunda yapmış olduğu deneylerin iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerinin uygun seviyelerde olduğunu ve gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermiştir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışma kapsamında katkı olarak kullanılan uçucu kül, sodyum hidroksit, sodyum silikat, polipropilen lifin kimyasal ve fiziksel özellikleri açıklanmıştır. Ayrıca kullanılan zemini tanımlamak amacıyla yapılan elek analizi, kıvam limitleri ve standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında birden fazla öncül kullanıldığı için yanıt yüzey yöntemi ile deney tasarımından faydalanılmıştır.

Uçucu Kül

Uçucu kül, yakıt, ısı için linyit ve kömür kullanan termik santrallerde ve metal üretmek için kömür kullanan kazan tesislerinde atık veya yan ürün olarak ortaya çıkar. Öğütülmüş kömür, termik santrallerde enerji için yakıt olarak kullanılır ve yanma, farklı tipte cüruf ve kül üretir. Uçucu kül ayrıca, gazla birlikte yükselemeyen ve yanma nedeniyle fırının tabanında biriken taban külü adı verilen belirli bir miktarda cüruf da oluşturabilir. Üretilen atığın yaklaşık %80'i uçucu küldür.

Uçucu kül, ASTM sınıflandırmasına dahildir. ASTM C618'e göre uçucu kül, F ve C olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Taş kömürünün yakılmasıyla F Sınıfı uçucu kül elde edilmektedir. Bu küllerin yapısında serbest kireç (CaO) bulunmamıştır. Kendiliğinden sertleşme özelliklerine sahip değildirler. Sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek sertleşirler. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu ile ilgili bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. *Uçucu Kül Kimyasal İçeriği (Alataş, 1996)*

Kimyasal Kop.	Uçucu Kül	%
SiO	Silisyumoksit	34-58
Al ₂ O ₃	Alimünyumoksit	20-40
Fe ₂ O ₃	Demirdioksit	4-24
CaO	Kalsiyumoksit	2-27
MgO	Magnezyumoksit	1-6
SO ₃	Sülfat	0,5-4
Kızdırma Kaybı		7,05

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül ise Sivas Kangal Termik Santralinden temin edilmiş olup öğütölme işlemlerine tabi tutulmuştur.

Sodyum Hidroksit

Kimyasal adı sodyum hidroksit olan kostik soda NaOH formülüne sahip çok güçlü bir baz bileşiktir. Doğada saf halde bulunmayan sodyum, hidrojen ve oksijen elementlerinden oluşan bileşik kimyasal olarak elde edilir. Sodyum veya kostik hidroksit, katı halde veya sıvı halde sulu bir çözelti halinde üretilir. İlk olarak 1807'de nasıl ortaya çıktığı net olmamakla birlikte, İngiltere'de Humphrey Day tarafından keşfedilmiştir. Renksiz sıvı, beyaz katı, aşındırıcı, elde kayma ve yanma hissine neden olur. Suda çok çabuk çözünür. Sodyum hidroksit, kokusuz, dehidrasyon etkisine sahiptir.

Kostik soda, sulu P çözeltisi içinde sodyum klorürün elektrolizinin bir sonucu olarak elde edilir. Ardından, klor gazı kaçar. Katı halde sodyum hidroksit elde etmek için çözeltideki su buharlaştırılmalıdır. Başka bir işlem olarak, sodyum karbonat ve kalsiyum hidroksit arasında iki yönlü bir yer değiştirme reaksiyonu ile elde edilir. Sodyum Hidroksitte molarite 40 gr/mol'dür.

Sodyum Metasilikat

Kimyasal olarak $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)\text{O}$ formülüyle bilinen kimyasal bileşiklerin ortak adı Sodyum silikattır. Bu bileşik grubunun en çok bilinen üyesi Na_2SiO_3 formülüne sahip sodyum metasilikattır. Sulu cam ya da sıvı olarak da bilinen bu malzemeler katı veya sulu çözelti formunda kullanılabilir. Tablo 2'de sodyum silikatın kimyasal kompozisyonu ile ilgili bilgi verilmiştir. Saf bileşikler beyaz veya renksizdir, ancak ticari örnekler demir içeren safsızlıkların varlığı nedeniyle genellikle mavi veya yeşildir.

Bu bileşikler refrakter, tekstil, ağaç işleri, çimento, pasif alev geciktirici, otomotiv ve diğer alanlarda kullanılmaktadır. Sodyum silikat kimyasal solüsyon yüzdeleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sodyum Silikat Kimyasal Solüsyon Özellikleri (Görhan, 2020)

Oksit İçeriği	Sodyum Silikat (%)	
Na_2O	Sodyum Oksit	26.98
SiO_2	Silisyumdioksit	8.77
H_2O	Hidrojen Oksit	64.25

Polipropilen Lif

Polipropilen liflerin (PP) teknik özelliklerine baktığımızda katalizör olarak saf propilen gazı kullanılarak polimerize edilir. Bu malzeme, günlük yaşamdaki polimer hammaddelerinin

yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Polipropilen, farklı oranlarda ve formlarda diğer malzemelerle birleşerek farklı ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Pekdemir, 2020)

Tablo 3. *Karışımda Kullanılan Polimer Lif Özellikleri*

Kimyasal Yapı	% 100 polipropilen lif
Özgül Ağırlık	0.90 g/cm ³
Lif Uzunluğu	6 mm
Çekme Dayanımı (MPa)	600 MPa
Elastiklik Modülü	3800 N/mm ²
Ergime Noktası	230 °C

PP, plastik ve tekstil endüstrilerinde polimer olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafifliği, yüksek mukavemeti, yüksek kimyasal direnci ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilen PP lifler, günümüzde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alanlardan bazıları şunlardır:

- Tekstil endüstrisi ile tamponlar ve çeşitli iç parçalarda
- İnşaat (sıcak su tesisatları, yağmur olukları, cam elyafı vb.) endüstrisinde
- Barajlarda yüksek mukavemetli ve geniş çaplı boruların değiştirilmesinde
- Mühendislik yapılarında fiber olarak kullanılır.

Çalışmada kullanılan polipropilen liflerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3'teki gibidir. Bu lif (polipropilen lif) genellikle plastik atıklardan elde edilir ve bu lif kullanılarak oluşabilecek çekme çatlaklarının önüne geçilebilir. Ayrıca toprak malzemesinin termal iletkenliğini, toplam ağırlığını ve kırılgenliğini azaltmaya yardımcı olur. Polipropilen lifler başka bir açıdan incelendiğinde, işleme sırasındaki en önemli termal analiz parametresi erime noktasıdır ve bu sıcaklık çoğu polipropilen lif için 170°C civarındadır. Zincirdeki kısa etilen zincir dizileri kristal boyutunu sınırlayacaktır. Enjeksiyon kalıplamada eriyik sıcaklığı 220°C-250°C, kalıp sıcaklığı ise oda sıcaklığı ile 65°C arasındadır. Kalıp sıcaklığı, polimerin soğuma hızını ve dolayısıyla ürünün nihai kristalliğini belirleyecektir. Enjeksiyon kalıplamada eriyik sıcaklığı 220°C-250°C, kalıp sıcaklığı ise oda sıcaklığı ile 65°C arasındadır. Kalıp sıcaklığı, polimerin soğuma hızını ve dolayısıyla ürünün nihai kristalliğini belirleyecektir. Ekstrüzyon sırasında, boğaz ile ön uç arasındaki sıcaklık 200°C-230°C arasındadır. Ancak döküm film ve lifin sıcaklığı daha yüksektir. Lif üretiminde, eriyik sıcaklığı enjeksiyon kalıplamaya göre biraz daha yüksektir, bu nedenle ürün daha kolay bozulur.

Zeminin Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Elek analizi

Zemin sınıflandırması, zemin malzemelerinin plastik davranışını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Zeminler, genellikle farklı boyut ve şekillerde malzemeler içerdiğinden, bunları parçacık boyutuna göre sınıflandırmak yaygındır. Bu çalışmada, ASTM D422-63 standardına (ASTM, 2007) göre elek ile dane boyut dağılımı belirlenmiştir. Elemelerde taneler, belirli büyüklükteki deliklerden veya açıklıklardan geçmelerine bağlı olarak büyüklüklerine göre sınıflandırılır. Farklı büyüklükteki partiküllerden oluşan zemin veya öğütülmüş materyalin "dane boyutu dağılımını" belirlemek için eleme veya elek analizi yapılır. Tane boyutu dağılımı, bir numunedeki parçacıkların sayısı ile boyut arasındaki ilişkidir. Elek analizi, bu numunenin içerdiği boyuttaki malzeme miktarını gösterir. Bir malzemenin parçacık boyutu dağılımını bilmenin birçok avantajı vardır.

Çalışma kapsamında Bayburt ilinden yerel zemin temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan zeminin, sırasıyla Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (UCSC) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.

Kıvam limitleri

İnce taneli zemini tanımlayan en önemli parametre kıvam limiti ile elde edilir. Atterberg limiti olarak da bilinen İsveçli kimyager Albert Atterberg, 1911'de ince taneli zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Atterberg, zemin-su karışımının kıvamındaki bu değişikliği tanımlamak için bir alt sınır ve bir üst sınır olmak üzere en az iki parametre kullanmıştır. Bunlar Kilin plastisitesini kaybettiği limiti plastik limit, viskoz akışın alt limitini ise likit limit olarak adlandırmıştır. Başka bir deyişle zeminin su oranının fazla olmasıyla zemin akışkan bir hal alır ve kesme direnci yok olur. Kurumaya bırakıldığı zaman kesme mukavemeti kazanır. Büzülme limiti yarı katı halden katı hale, plastik limit (PL) zeminin plastik halden yarı katı hale, likit limit (LL) ise zeminin sıvı halden plastik hale geçtiği sınır değerlerdir. Bu sınır değerler zeminin mekanik özellikleri ile ilgili bilgi vermektedir

Likit limit, zeminler için önemli tanımlama parametrelerinden biridir ve iki standart yöntemle belirlenir. Bunlar Casagrande ve Koni Batma Yöntemidir. Koni Batma Yönteminde konik uçlu bir metalin hazırlanan homojen bir zemin çamuru içine kendi ağırlığı ile batırılması esasına dayanır. Plastik limit ise yoğurma sırasında ıslak yüzeyde çatlakların oluştuğu su içeriği olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, plastik limit, zeminin yarı katı bir malzemeden plastik bir malzemeye dönüştüğü su içeriğinin değeridir.

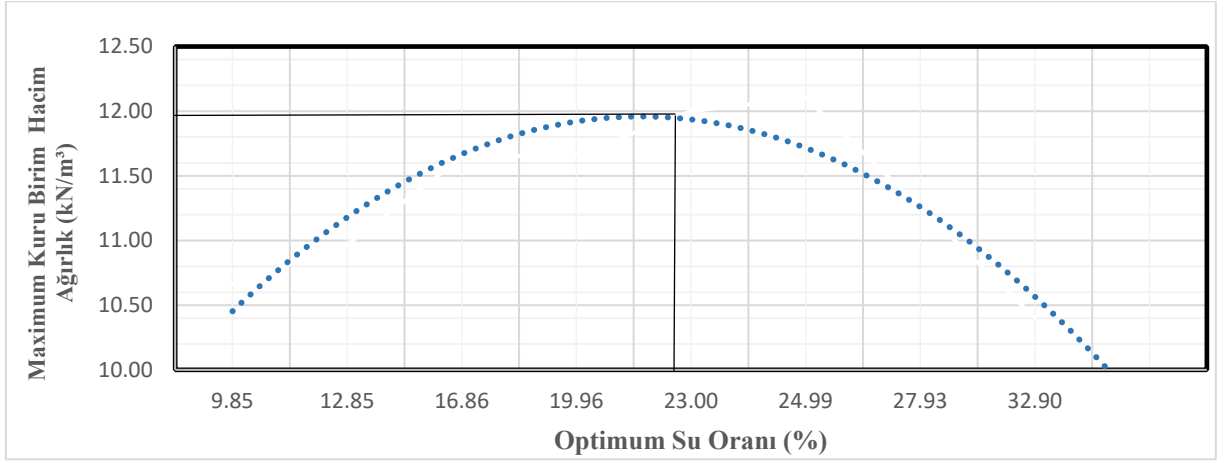
Çalışma kapsamında Bayburt Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında temin edilen yerel zemin üzerinde likit limit değerini belirlemek için koni penetrasyon deneyi ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve deneylere karşılık gelen limit değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Buna göre çalışmada kullanılan zeminin, sırasıyla Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Kıvam Limitleri Değerleri

Kıvam Limiti	Limit Değeri (%)
Likit Limit (LL)	55.6
Plastik Limit (PL)	32.7
Plastisite İndisi(PI)	22.07

Standart kompaksiyon deneyi

Standart kompaksiyon deneyi, zeminin optimum su içeriğinin belirlenmesi ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı ya da kuru yoğunluğu belirlemek için kullanılır. Çalışma kapsamında kullanılan zeminine yapılmış olan standart kompaksiyon deneyine ait grafik Şekil 4'te sunulmuştur. Buna göre zeminin optimum su içeriği % 23 iken ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı 12 kN/m³ olarak belirlenmiştir.

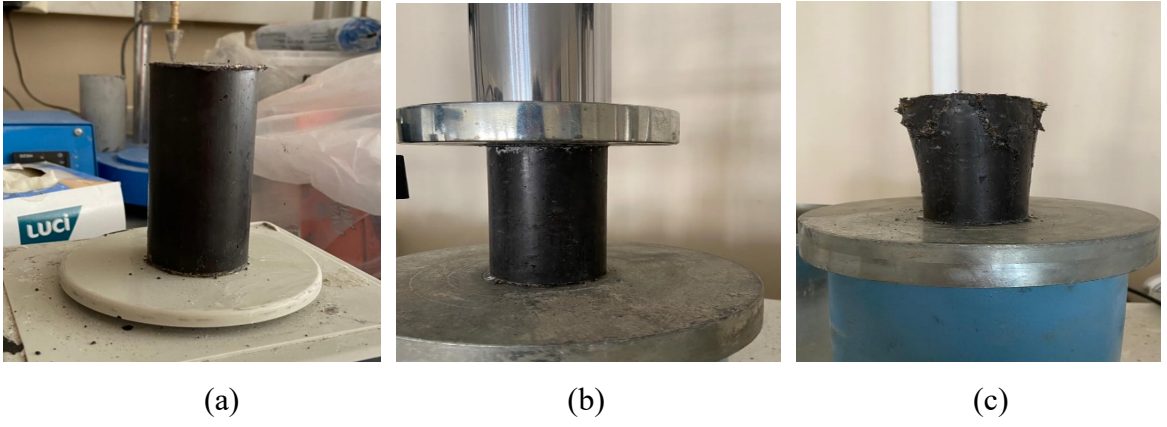


Şekil 4. Zeminin kompaksiyon grafiği

Numune Hazırlama

Çalışma kapsamında yanıt yüzey yöntemiyle belirlenen deney tasarım matrisinde belirlenen oranlara göre numuneler hazırlanmıştır. Zemin numunelerinin hazırlanmasında Amerikan Karayolları idaresi (FHWA)'nın derin karıştırma kolonları için önerdiği prosedür dikkate alınmıştır. Hazırlanan zemin karışımlarında F sınıfı uçucu kül bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan aktivatörün içeriği sodyum hidroksit ve sodyum silikattan oluşmaktadır. Aktivatör karışımında kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesi 10 gr/mol olup 800 gram sodyum hidroksite 2000 ml su eklenerek hazırlanmıştır.

İçerik olarak 500 gram zemine 250 gram uçucu kül, 374 gram aktivatör ve zemin ağırlığının %1,5'i kadar polipropilen lif kullanılarak zemin karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım üç aşamada şişlenerek 50 mm genişliğinde 100 mm yüksekliğindeki silindirik numune kaplarına şişleme çubuğu yardımıyla 3 aşamada her aşamada 10 şişleme olacak şekilde toplam da 30 şişleme ile yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler istenilen sıcaklığa ayarlanan etüvlere 7 gün ve 28 gün kür alacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 5. Numune örneği ve tek eksenli basınç deneyi uygulaması

Şekil 5.a'da 7 gün dayanım almış zemin numunesi verilmiştir. Şekil 5.b'de kırılma anı gösterilirken ve Şekil 5.c'de kırılma sonrasında numunenin son hali verilmiştir.

Yanıt Yüzey Yöntemi ile Deney Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde, yanıt yüzeyi yöntemi (YYY) kullanılarak maksimum serbest basınç dayanımı elde etmek için öncül ve aktivatör miktarının optimize edilmesi amaçlanmıştır. Deney tasarımı ve istatistiksel analizler için Design-Expert 12 istatistik yazılımı kullanılmıştır. Deney tasarımında $\alpha=0.5$ için merkezi kompozit tasarım (CCD) kullanılmıştır. Üç faktörlü bir deneysel tasarım, üç faktöriyel noktanın (üst ve alt limitleri temsil eder), üç eksenel (yıldız) noktanın (faktöriyel limitlerin ne kadar dışında olduğunu temsil eder) ve altı merkez noktanın (girişin ortalama değerlerini temsil eden) tekrarlarını içerir. Bu amaç doğrultusunda aktivatör, uçucu kül (UK) miktarlarının UCS değeri üzerindeki etkilerini incelemek için beş seviyeli CCD yapılmıştır. Deney tasarımında parametrelerin ağırlıkça yüzdeleri bağımsız değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Bu bağımsız değişkenler $X_1 = \text{Uçucu Kül Ağırlığı/Zemin Ağırlığı (UK)}$: Uçucu Kül Ağırlığı numunelerin serbest sıkıştırma mukavemeti (UCS) ise yanıt olarak kabul edilmiştir. Bağımsız değişkenlerin merkezi noktaları, üst ve alt limitleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Bağımsız Değişkenlerin Üst, Alt ve Merkez Değerleri

Bağımsız Değişkenler		UK/Z	A/(UK+Z)
		X ₁	X ₂
	Kodlanmış Değer	Gerçek Değer	
Faktörler Düzeyi	-1	0.1	0.25
	-0.5	0.2	0.337
	0	0.3	0.425
	0.5	0.4	0.512
	1	0.5	0.6

Silindirik zemin numuneleri Tablo 6’da gösterilen deney tasarımı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Tasarım 29 çalışmadan oluşmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında Uçucu Kül, aktivatör miktarı Tablo 5’e göre belirlenmiş ve zeminle karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar FHWA’nın önerileri dikkate alınarak kalıplanmıştır. 50mm çapında ve 100mm yüksekliğindeki numuneler 5, 10, 20 ve 30 °C sabit sıcaklıklarda 7 gün ve 28 gün süreyle küre tabi tutulmuştur. Kürlenmiş numuneler, ASTM D2166 dikkate alınarak UCS testine tabi tutulmuştur. Elde edilen UCS değeri, yanıt yüzey tasarımında yanıt olarak değerlendirilmiştir. Deneysel tasarım matrisi ve UCS değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. *Deneysel Tasarım Matrisi*

	Bağımsız Değişkenler		Yanıt
	A/(UK+Z)	UK/Z	UCS (MPa)
1	0.25	0.1	0.72343
2	0.25	0.1	1.09830
3	0.25	0.1	0.80892
4	0.25	0.5	0.61162
5	0.25	0.5	0.52613
6	0.25	0.5	0.55901
7	0.6	0.1	1.28244
8	0.6	0.1	1.48632
9	0.6	0.1	1.28244
10	0.6	0.5	2.10452
11	0.6	0.5	3.33436
12	0.6	0.5	3.42643
13	0.425	0.2	3.86707
14	0.425	0.2	4.35374
15	0.425	0.2	3.65004
16	0.425	0.4	5.95844
17	0.425	0.4	8.54306
18	0.425	0.4	4.33401
19	0.3375	0.3	3.53166
20	0.3375	0.3	4.13671
21	0.3375	0.3	4.27482
22	0.5125	0.3	0.04603
23	0.5125	0.3	0.04603
24	0.5125	0.3	0.05261
25	0.425	0.3	2.72931
26	0.425	0.3	5.08375
27	0.425	0.3	2.51228
28	0.425	0.3	3.73553
29	0.425	0.3	2.72273

İstatistiksel analizlerle elde edilen uyumsuzluk değeri, p değeri ve regresyon katsayısı değerleri dikkate alınarak model için indirgenmiş kübik model kullanılmıştır. İstatistiksel olarak anlamsız olan terimleri elemek için model üzerinde geri analiz yapılmıştır ($p>0.1$).

Oluşturulan modelin doğruluğunu tespit etmek için ANOVA (Tek Yönlü Varyans Analizi) yapılmış ve ANOVA sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur. Tablodan modellerin R^2 değerlerinin 1'e çok yakın olduğu görülmüştür ki bu istenen bir durumdur. Modelin tahmin gücünün belirlenmesi adına düzeltilmiş R^2 ve tahmin edilen R^2 terimleri kullanılır. Artıkların toplamının ortalamaların toplamına oranı ne kadar küçükse, R^2 o kadar yüksek olur. Yüksek R^2 değeri, oluşturulan istatistiksel modelle yapılan tahminlerin gerçek değerler ile uyum içerisinde olduğunu gösterir. Tablo 7'de, modellerin düzeltilmiş R^2 ve tahmin edilen R^2 değerlerinin nispeten yüksek olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 ile tahmin edilen R^2 arasındaki fark 0.2'den az olduğundan, model ile yapılan tahminlerin makul sonuçlar vereceği anlaşılmaktadır. Yeterli hassasiyet (A.p), sinyal-gürültü oranının 4'ten büyük olduğunu ölçer. Yeterli hassasiyet değerinden, oranın yeterli bir sinyali gösterdiği ve modelin tasarım alanında gezinmek için kullanılabileceği görülmektedir. Tablo 7'de verilen F değeri bütün örneklemeleri aynı anda karşılaştırmaya yararken p değeri kritik değer olarak verilmiştir. ANOVA sonuçlarından modelin p değerinin 0.0001 ve F değerinin sırasıyla 18.39'dan küçük olduğu görülmektedir. F ve p değerleri modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. 1.10'luk uyum eksikliği F-değeri, uyum yokluğunun önemsiz olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 7. ANOVA Sonucu

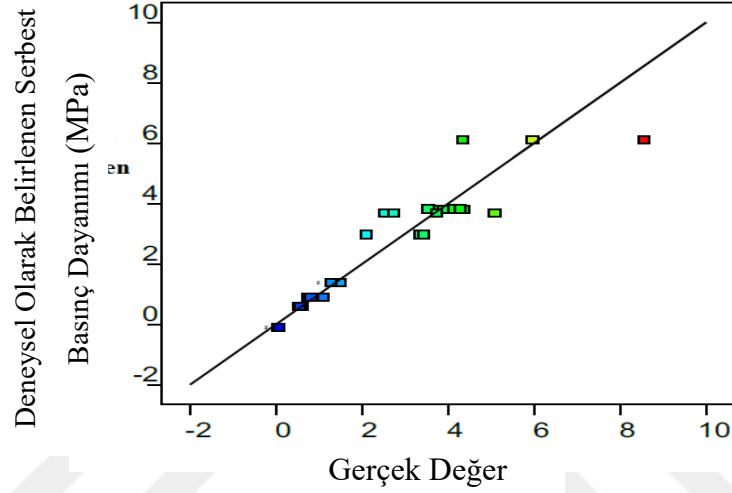
Serbest Basınç Dayanımı, Y_1						
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-Değer	P-Değer	
Model	99.71	7	14.24	18.39	<0.0001	Önemli
X_1 - UK/Z	8.08	1	8.08	10.44	0.004	
X_2 -A/(UK+Z)	23.20	1	23.20	29.95	<0.0001	
X_1X_2	2.75	1	2.75	3.55	0.0733	
X_1^2	18.84	1	18.84	24.32	<0.0001	
X_2^2	38.97	1	38.97	50.31	<0.0001	
$X_1^2X_2$	28.81	1	28.81	37.20	<0.0001	
$X_1X_2^2$	5.32	1	5.32	6.87	0.0159	
Kalan	16.27	21	0.7746			
Uygunsuzluk	0.8495	1	0.8495	1.1	0.3063	Önemsiz
Saf Hata	15.42	20	0.7708			
Kor Toplam	115.97	28				
S.D.	0.8801	R^2	0.8597			
Ortalama	2.65	Adj. R^2	0.813			
C.V. (%)	33.22	Pre. R^2	0.7489			
		A.p	134.780			

Modelin Doğrulanması

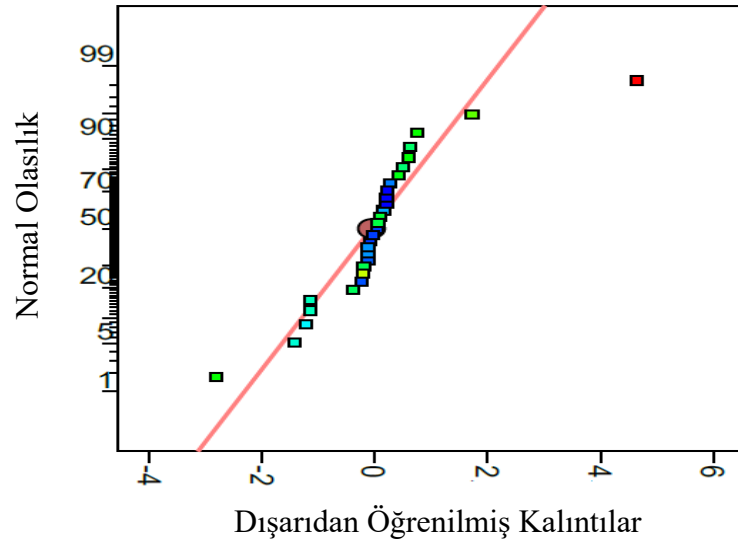
Geliştirilen istatistiksel analiz sonucunda uçucu kül içeriği ve aktivatör miktarı parametrelerine bağlı olarak serbest basınç dayanımını tahmin eden model geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak. Model denklemlerinin sağladığı tahminler ile ilgili bağımsız değişkenler dikkate alınarak hazırlanan numunelere ait serbest basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da görülebileceği gibi, modelin tahminleri ile deneysel sonuçlar arasında istatistiksel anlamsa iyi bir eşleşme vardır ($R^2=0.86$).

İstatistiksel olarak artık; gözlemlenen değer ile buna karşılık oluşturulan model yardımı ile tahmin edilen değer arasında, çeşitli yöntemlerle belirlenmiş olan farklılar olarak tanımlanabilir. Artıkların normal olasılık dağılım grafikleri, tahmini değer ile gerçek değer arasında oluşan hatanın dağılımını sunan bir grafikdir. Modelin hata dağılımının normal dağılımdan ne kadar uzaklaştığının belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Şekil 6.b deneysel

tasarım matrisindeki bağımsız değişkenler dikkate alınarak, oluşturulan model için artıkların olasılık dağılımını göstermektedir. Temel olarak tahmini değer ile gerçek değer arasındaki farkın normal olasılık dağılımına uygun olduğu kabul edilir. Bu nedenle artıklar ile normal dağılım arasında doğrusal bir ilişki vardır. Modelin normal olasılık grafiği Şekil 6.a'da gösterilmiştir. Buna göre modeldeki sapmalar nispeten normal olasılık doğrusuna yakın değerler almaktadır. Bu nedenle, oluşturulan yanıt yüzey modeli tarafından verilen tahminlerin öğrenilen artıklarla tutarlı olduğu varsayılabilir.



(a)

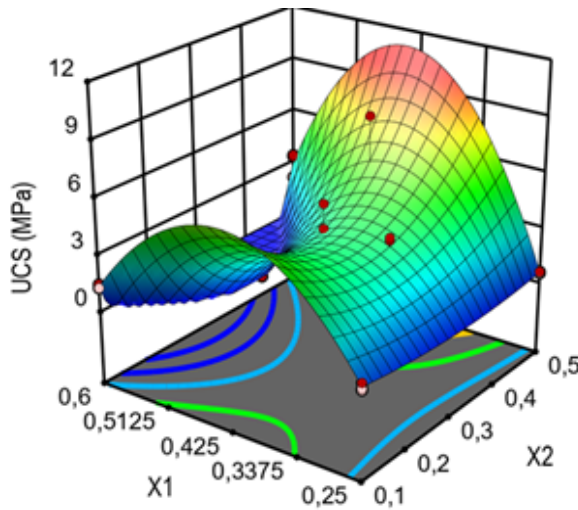


(b)

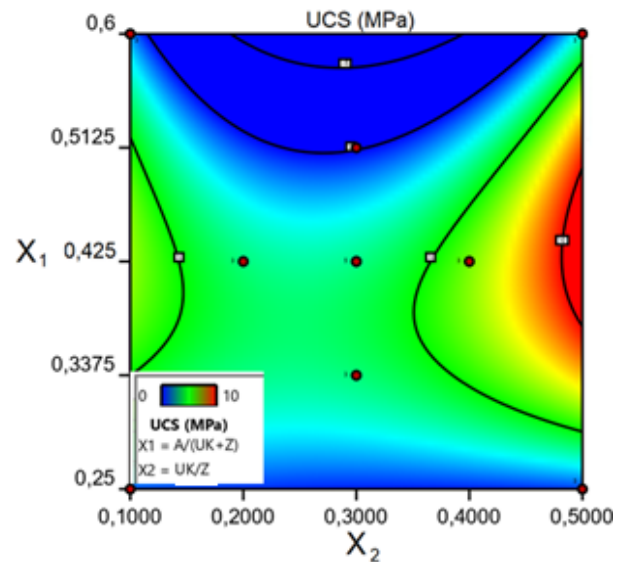
Şekil 6. Modelin doğrulanması

Bağımsız Değişkenlerin Optimizasyonu

Şekil 7’de görülen üç boyutlu grafiklerden aktivatör miktarı ve uçucu kül oranı faktörlerinin serbest basınç dayanımı üzerindeki birleşik etkisi görülmektedir. Şekil 7.b’de görülen konturlardan maksimum dayanımı veren optimum alan görülmektedir. Şekil 7.a ve 7.b’de gösterildiği gibi en yüksek UCS değerleri $X_1=0.3-0.5$ ve $X_2=0.45-0.5$ aralığında elde edilmektedir. Şekil 7.a’dan $X_1=0.25-X_1=0.45$ aralığında aktivatör miktarının artmasına bağlı olarak dayanımın da arttığı, maksimum değer aldığı ve $X_1=0.45-X_1=0.6$ aralığında artan aktivatör miktarının serbest basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Düşük aktivatör içeriğinde kıvam kaynaklı yerleşme problemi nedeniyle malzeme içerisinde büyük boşlukların kalması, yüksek aktivatör içeriğinde ise malzemenin aşırı akışkan olması dayanım kayıplarının sebebinin oluşturmaktadır. UCS değerinin çift tepe noktaları Şekil 7.a ve Şekil 7.b’de görülmektedir. Bu durum çeşitli alkali aktivasyon reaksiyonları ile açıklanabilir. Alkali aktivasyonu, alkali metallerin kaynağı ile silikatlar arasındaki reaksiyonların en geniş sınıflandırmasıdır. Grout ortamının pH değeri nispeten düşüktür ve düşük X_2 değerleri için Ca miktarı nispeten yüksektir. Bu nedenle sistem, CSH gibi alkaline aktif yüksek mukavemetli ürünler oluşturmak için yüksek bir potansiyele sahiptir. İkinci pik ($X_2=0.5$) C(A)SH ürünleri ile açıklanabilir. Artan aktivatör miktarı yüksek alkaliniteye neden olur. Alümino-silikat jeller çoğunlukla nispeten yüksek alkali ortamlarda oluşturulur.



(a)



(b)

Şekil 7. Yanıt yüzey yöntemi optimizasyonu

Çalışmanın bu bölümünde, maksimum serbest basınç dayanımı elde etmek için optimum bağımsız değişken miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Design Expert 12 istatistik yazılımındaki optimizasyon aracı kullanılmıştır. Optimizasyonda yazılımın bağımsız değişkenler ve yanıtlar için sunduğu bazı tercihler kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler için "aralık" tercihi ve yanıt için "maksimum" tercihi kullanılmıştır. Optimum çözümlerin belirlenmesinde 0 ile 1 arasındaki arzu edilebilirlik değerleri (D) dikkate alınmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen ideal değerlerden $X_1=0.49$, $X_2=0.48$ değerleri (D=1) optimum değerler olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamında optimize edilen oranlar dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır.



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

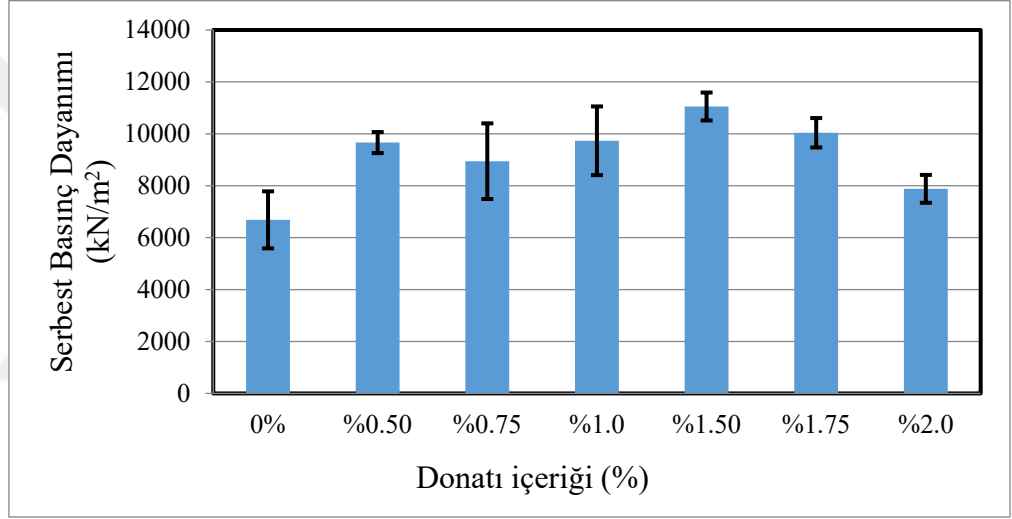
Çalışma Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Zemin numunesine polipropilen lif ve aktivatör katılarak hazırlanan zemin numunelerinin farklı sıcaklıklarda kürlenmesi sonucu oluşan dayanım farklılıkları incelenmiştir. Çalışma kapsamında polipropilen lif katkısının geopolimer katkılı derin karıştırma kolonlarının dayanımına olan etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla optimize edilen katkılara ek olarak belirli oranlarda polipropilen lif katkısı eklenerek zemin numuneleri oluşturulmuştur. Elde edilen zemin numuneleri oda sıcaklığında 7 gün küre tabi tutulmuştur. Numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenerek ideal donatı miktarı belirlenmiştir. Belirlenen polipropilen lif miktarı ile hazırlanan derin karıştırma kolon numuneleri 5°C, 10°C, 20°C ve 30°C’de 7 gün ve 28 gün kürlenmiştir. Polipropilen lif ve aktivatör kullanılarak hazırlanan zemin numuneleri tek eksenli ve üç eksenli serbest basınç deneylerine tabi tutularak serbest basınç dayanımı, kırılma anında birim kısalma, elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri belirlenmiştir. Bu bölümde deneylerden ve yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Polipropilen Donatı Miktarının Dayanım Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi

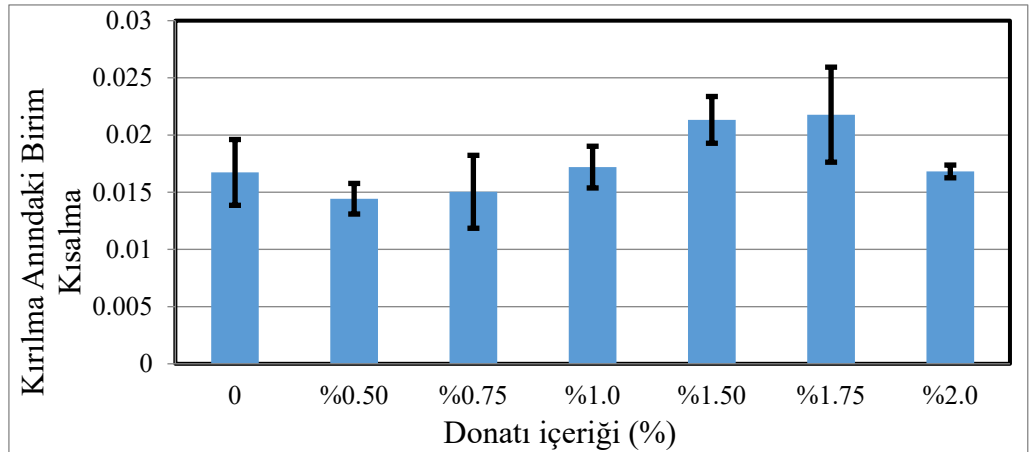
Yanıt yüzey yöntemi ile optimum uçucu kül ve aktivatör oranı belirlenen karışımların ideal polipropilen lif oranlarının belirlenmesi için laboratuvar ortamında Amerikan Karayolları İdaresinin (FHWA) derin karıştırma kolonları için önerdiği numune hazırlama yöntemine uygun şekilde zemin numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneler 100 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapında silindirik numunelerdir. Hazırlanan numuneler 7 gün süre ile etüvde 28°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanım, kırılma anındaki birim kısalma ve elastisite modül grafikleri bu bölümde sunulmuştur. Doğal zemine sabit oranlarda aktivatör ve uçucu kül katılırken farklı oranlarda polipropilen lif (% 0,5, % 0,75, %1, %1,25, % 1,5, %2) ilave edilmiştir.

Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10’da farklı oranlarda polipropilen lif kullanılan ve 7 gün kür süresine tabi tutulan numunelerin serbest basınç dayanım, kırılma anındaki birim kısalma ve elastisite modülü grafikleri verilmiştir. Sırasıyla %1,5, %1,75, %0,5 lif kullanılan numuneler en yüksek dayanımı gösterirken, en düşük dayanımı polipropilen lif kullanılmayan numuneler göstermiştir. Birim kısalma ve elastisite modülü grafikleri incelendiğinde yük altında şekil

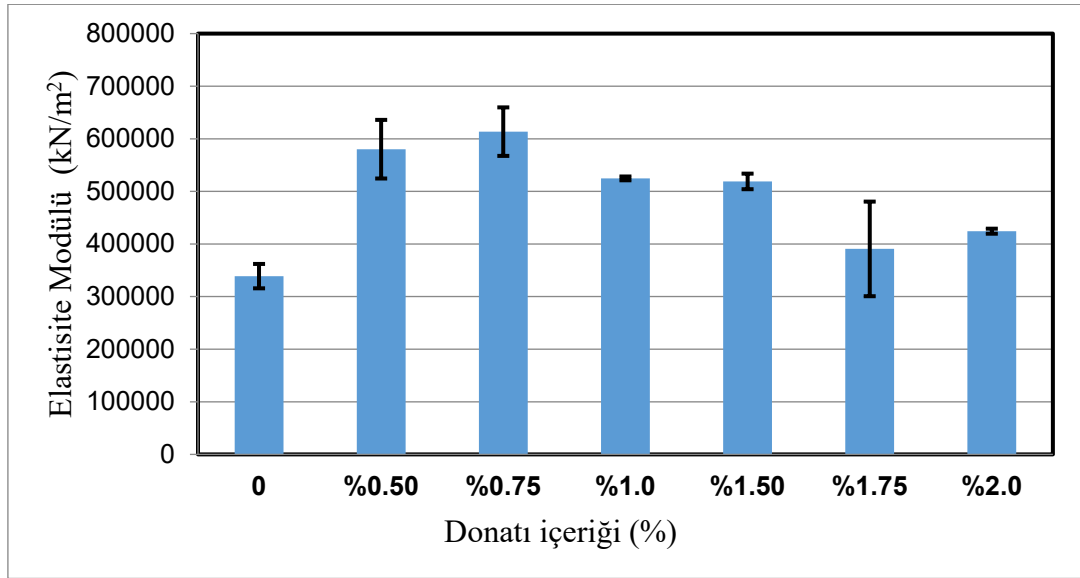
değiştirmesi elastisite modülü en yüksek olan ve kırılma anında birim kısalması en az olan %0,5 polipropilen lif kullanılan zemin numunesidir. Dayanımı ve yük altında elastisite modülü yüksek olan %1,5 ve %1,75 polipropilen lif kullanılan zemin numuneleri %0,5 lif kullanılan numunelere göre dayanımında %50'ye varan artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise polipropilen lifin hacimce sıvıyı absorbe etmesi ve boşluk oranındaki artış olduğu deney aşamasında gözlemlenmiştir. Tablolarda sunulan dayanım verileri incelendiğinde, polipropilen lifin doğal zemin stabilizasyonuna olumlu etkiler gösterdiği ancak hacimce yüksek olan bu lifin fazla kullanılması durumunda dayanımına olumsuz etki ettiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak deneme yanılma yöntemi kullanılarak yapılan deneyler kapsamında %1,5'lik numune değeri kullanılacaktır.



Şekil 8. Polipropilen lif oranının serbest basınç dayanımına olan etkisi



Şekil 9. Polipropilen lif oranının kırılma anındaki birim kısalmaya etkisi

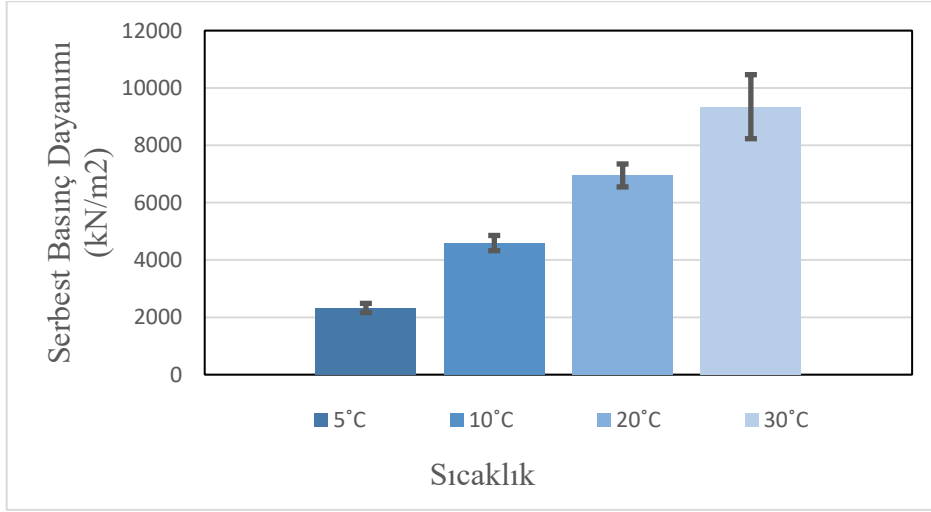


Şekil 10. Polipropilen oranının lif elastisite modülüne etkisi

Farklı Sıcaklıklarda Kürlenmiş Numunelerin Dayanım Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi

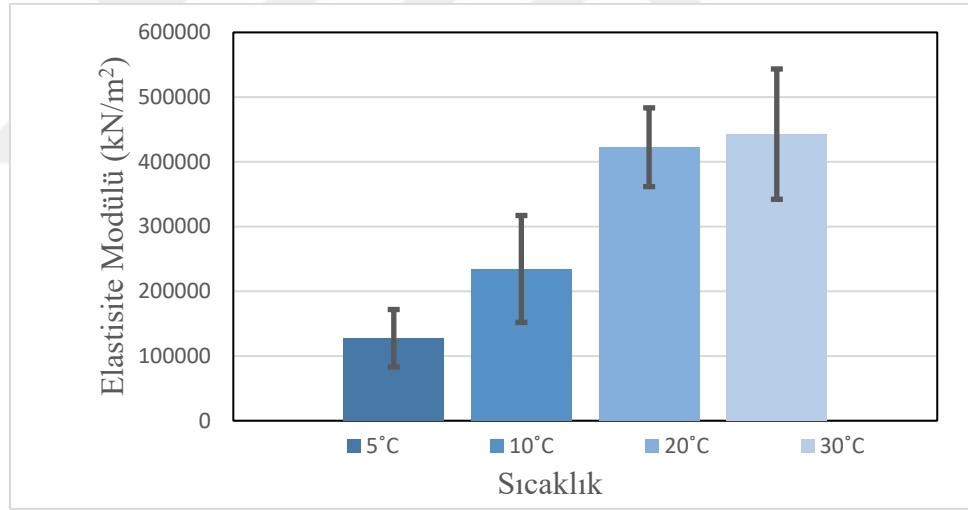
Bu kısımda maksimum dayanımı veren polipropilen donatı, aktivatör, bağlayıcı miktarları dikkate alınarak zemin örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan zemin örnekler 5°C, 10°C, 20°C ve 30°C ortam sıcaklıklarında, 7 gün ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelere serbest basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı (UU) testleri uygulanarak ortam sıcaklığının numunelerin serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Şekil 11'de 7 günlük kür sonuçlarına göre sıcaklık artışı ile doğru orantılı şekilde dayanımlarda da artış gözlemlenmiştir. 7 günlük tek eksenli serbest basınç sonuçlarına göre en yüksek dayanım 30 °C'de kürlenmiş zemin numunelerinde gözlenirken, 20 °C'de sıcaklıkta kürlenmiş numuneler ise 30 °C'de kürlenmiş zemin numunelerine göre 1,5 kat daha az dayanım göstermiştir.



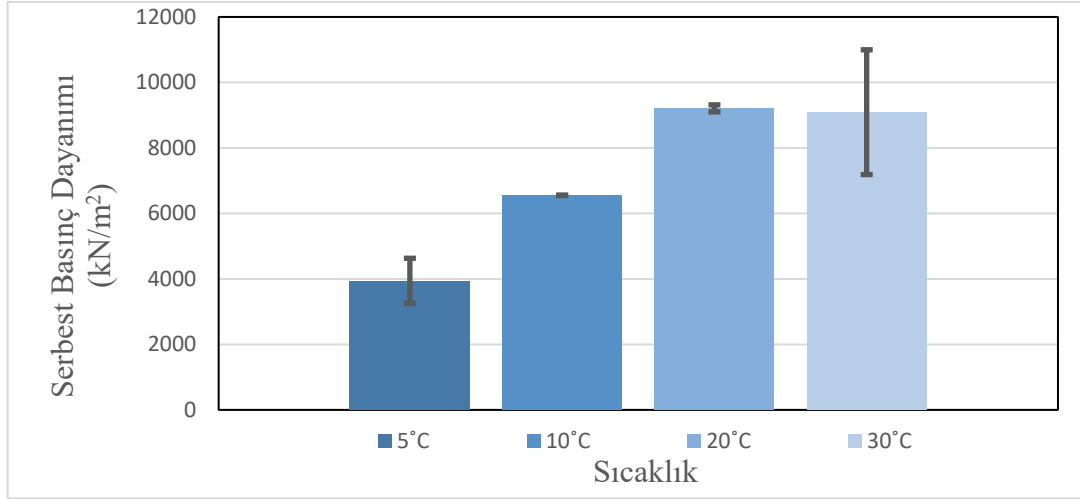
Şekil 11. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 12’de elastisite modül grafikleri incelendiğinde ise yük altında şekil değiştirmesi en yüksek olan 30 °C kürlenmiş zemin numuneleri olduğu göstermiştir. 5 °C, 10°C ve 20 °C de kürlenmiş zemin numuneleri de sıcaklık değişiminin yük altındaki elastik davranışı sıcaklık ile doğru orantılı olacak şekilde dağılım göstermiştir.



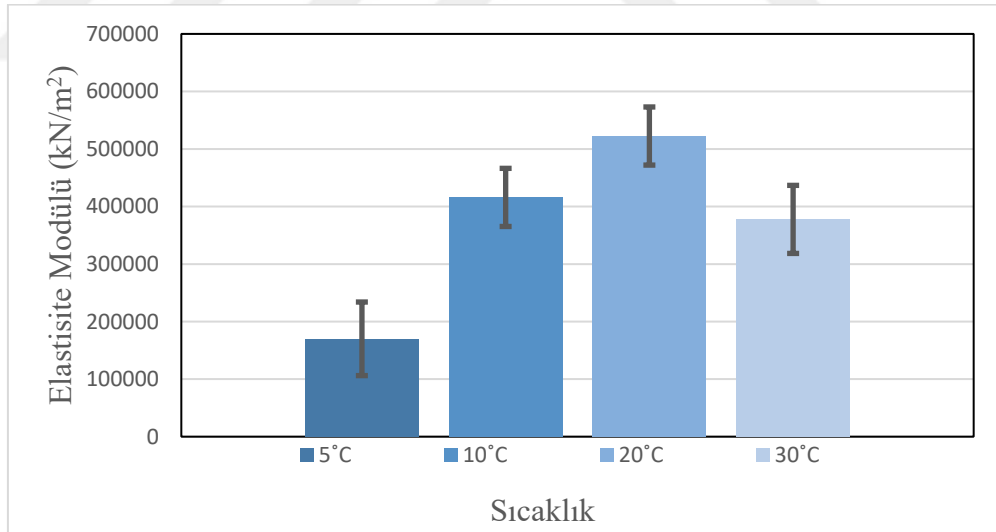
Şekil 12. 7 Günlük kür alan numunelerde sıcaklığın elastisite modülüne etkisi

Şekil 13’de 28 günlük kür süresi sonunda farklı sıcaklıklar arasında en yüksek dayanımın 7 günlük kür süresinde olduğu gibi 30 °C’de kürlenmiş zemin numunelerinde meydana geldiği görülmüştür. 20 °C’de kürlenmiş zemin numuneleri ise 30°C’de kürlenmiş zemin numunelerine göre 0,5 kat daha az dayanım göstermiştir. 7 günlük ve 28 günlük dayanım sonuçları karşılaştırıldığında 30 derecedeki zemin numuneleri 0,5 kat artış gözlemlenmiştir. 5°C, 10°C ve 20°C’de kürlenmiş zemin numunelerinde 2 kat daha fazla dayanım artışı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 30°C’deki zemin numuneleri için 7 günlük kür süresinin yeterli olduğu kanısına varılmıştır



Şekil 13. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın serbest basınç dayanımına etkisi

Şekil 14'deki elastisite modülü grafikleri incelendiğinde ise yük altında elastisite modülü en yüksek olan 20°C'deki zemin numuneleri olurken, şekil değiştirmeye en az maruz kalan 5°C'de kürlenmiş zemin numuneleridir. 10°C'deki zemin numunelerinin elastisite modülü 30°C'de kürlenmiş zemin numunelerine göre 0.5 kat daha fazladır.



Şekil 14. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın elastisite modülüne etkisi

7 ve 28 günlük kür sonunda elde edilen dayanım verilerinden çıkarılabilecek sonuç sıcaklık artışının etkisinin derin karıştırma kolonların üzerindeki etkisinin olumlu olduğu açıkça ortaya koymaktadır. 30°C'deki zemin numunelerinin maksimum dayanıma ulaşmasında 7 günlük kür süresinin yeterli olduğu ancak 5°C, 10°C ve 20°C'deki numunelerin maksimum dayanımı elde etmek için daha uzun bir kür süresinin gerekli olduğu gözlemlenmiştir.

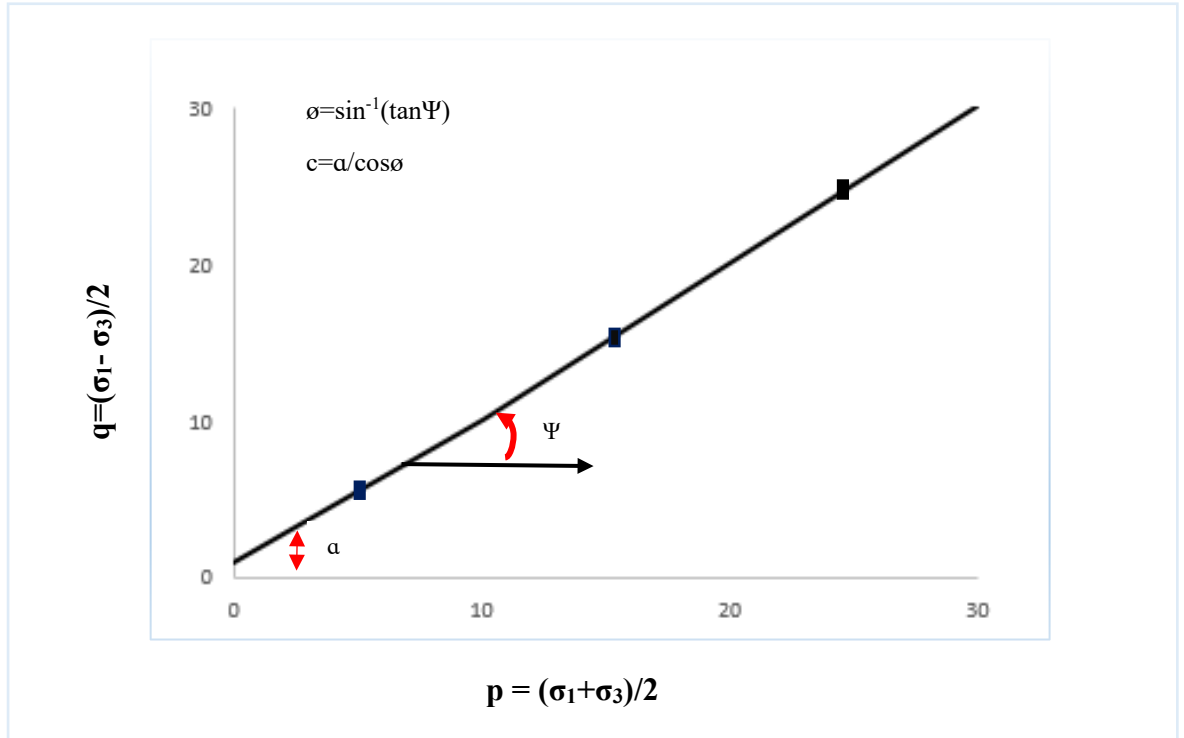
Üç Eksenli Basınç Deneyi Uygulama Aşamaları ve Sonuçları

Bu bölümde üç eksenli basınç deneyi uygulama aşamaları ve sonuçları verilmiştir. Üç eksenli deney uygulama aşamaları Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Üç eksenli basınç deneyi uygulama aşamaları

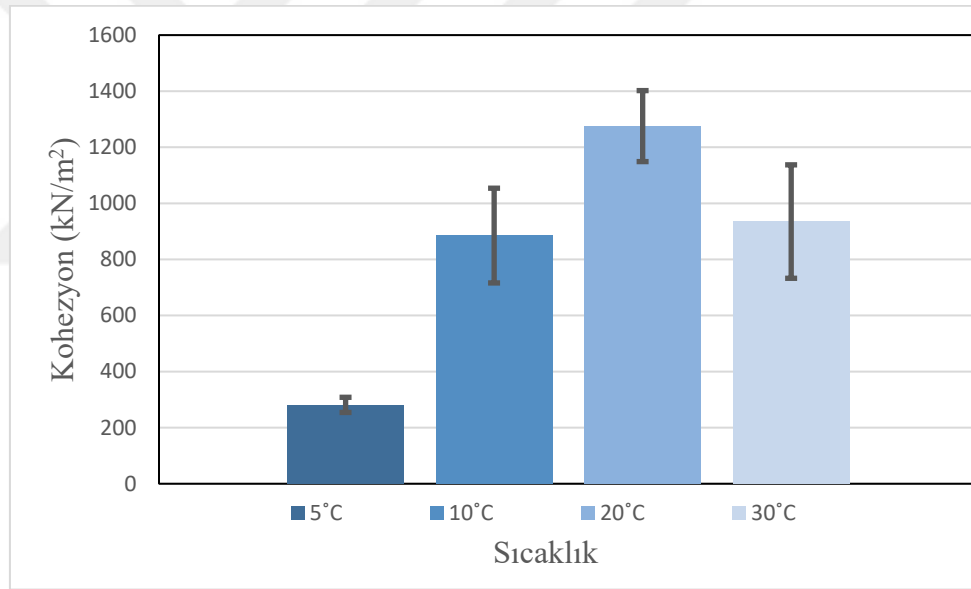
Şekil 15’te zemin numunesi membran içerisine yerleştirilmek olup sonraki aşama olan üç eksenli deney düzeneği basınçlı suyu haznesine almaya başladığı andaki görüntüsü ve kırım sonrası deney düzeneğinin son halidir.



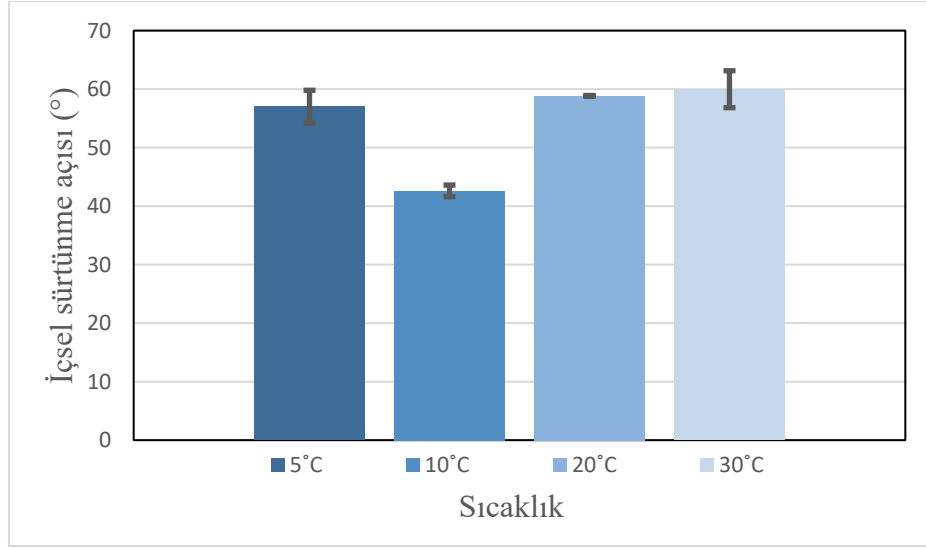
Şekil 16. Mohr-Coulomb kırılma zarfı ve p-q diyagramı ile c ve ϕ 'nin belirlenmesi

Mohr-Coulomb kırılma zarfı, killi zeminlerin kesme mukavemetini belirlemek için kullanılır. Zarf doğrusal özellikler gösterir, bu nedenle c ve ϕ Mohr dairelerini teğet olarak kesen çizgiden belirlenebilir. Ancak, stabilize edilmiş veya yüksek oranda sıkıştırılmış zeminlerde kırılma çizgisi içbükeydir. Bu tip zeminlerde lineer olarak çizilen yırtılma zarfı, kesme mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde belirsizlik yaratır. Bu durumda, c ve ϕ değerlerini elde etmek için bir p-q grafiği kullanılması önerilir. Bu nedenle çalışmada c ve ϕ parametreleri p-q grafiği ile belirlenmiştir. Aşağıda gösterilen Şekil 16'da yoğun şekilde sıkıştırılmış bir zemine ait mohr-coulomb kırılma zarfı ve p-q diyagramı ile c ve ϕ' nin belirlenmesi gösterilmiştir.

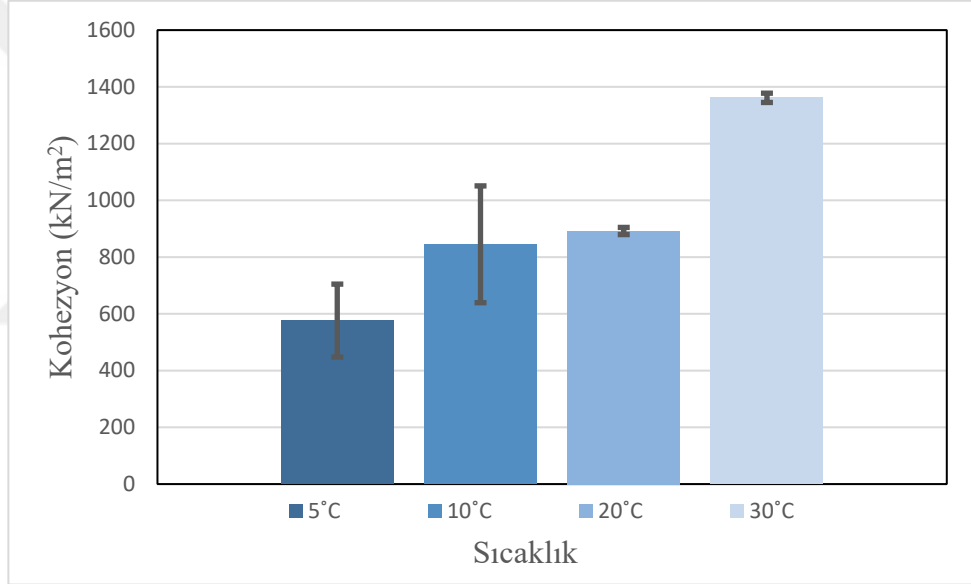
Çalışma kapsamında 7 ve 28 gün kürlenene numuneler 50, 100 ve 200 kN/m²'lik çevresel basınç altında kırılmıştır. Farklı sıcaklıklar için elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme değerleri Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de sunulmuştur.



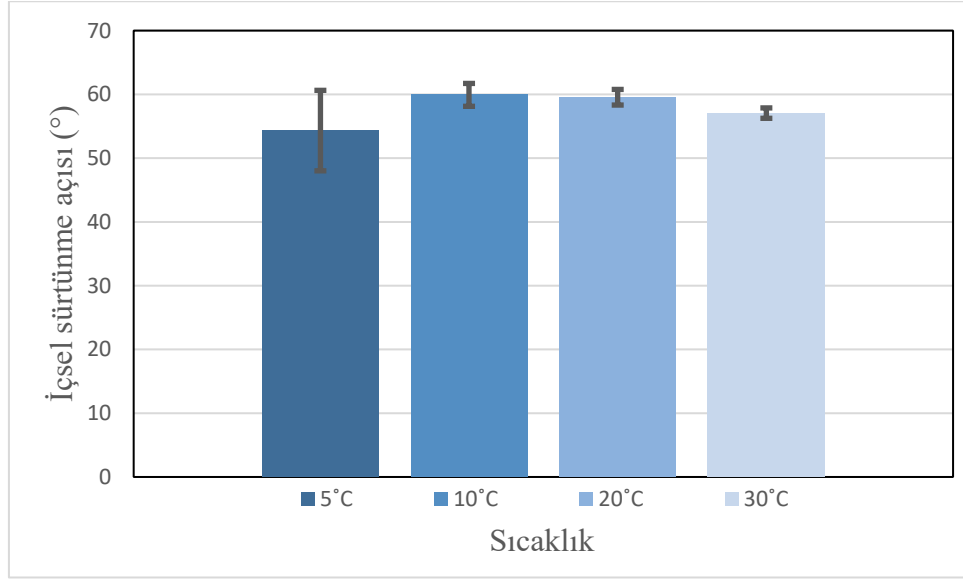
Şekil 17. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın kohezyona etkisi



Şekil 18. 7 Günlük kür sonucunda sıcaklığın içsel sürtünme açısına etkisi



Şekil 19. 28 Günlük Kür Sonucunda Sıcaklığın Kohezyona Etkisi



Şekil 20. 28 Günlük kür sonucunda sıcaklığın içsel sürtünme açısına etkisi

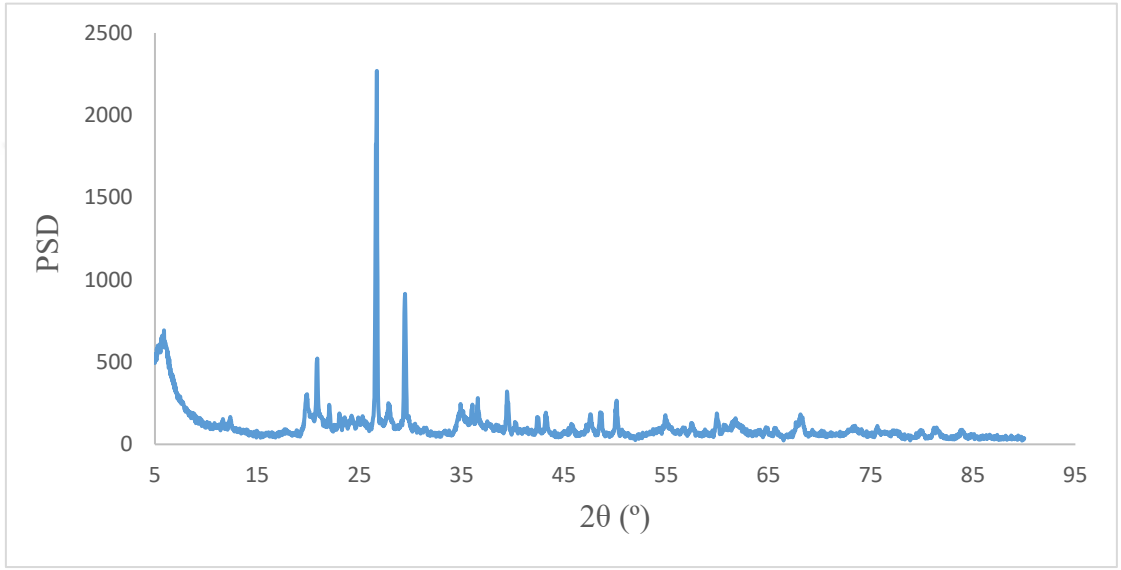
Verilen grafiklerde üç eksenli basınç deneyleri sonucu ile elde edilen grafikler sırasıyla 7 günlük ve 28 günlük kohezyon, içsel sürtünme açısı değerleri ve bu değerlerin standart sapmaları görülmektedir.

İçsel sürtünme açısı değerleri Şekil 18 ve Şekil 20 incelendiğinde zeminin kayma gerilmesine karşı en yüksek içsel sürtünme açısı değeri Şekil 4.18’de 7 günlük kür süresi sonucunda 30°C numuneler gösterirken, Şekil 20’de 28 günlük kür süresi sonucunda ise 5°C üç eksenli deneye tabi tutulan numuneler göstermiştir. Kohezyon grafikleri incelendiğinde kohezyon değerinde Şekil 17’de 7 günlük kür süresi sonucunda 10°C numuneler gösterirken, Şekil 19’da 28 günlük kür süresi sonucunda ise 30 °C üç eksenli deneye tutulan numuneler göstermiştir. Artan kür süresinin kohezyon değerlerinin artmasına neden olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kür sıcaklığı ve süresindeki artışın zeminin kohezyon parametreleri üzerinde etkili olduğu görülürken içsel sürtünme açısı parametreleri için aynı durum söz konusu değildir. Ancak grafikler incelendiğinde, farklı kür sıcaklıkları ile yapılan deneylerde kohezyon ve içsel sürtünme verilerine göre 10 °C ve 30 °C numunelerin daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

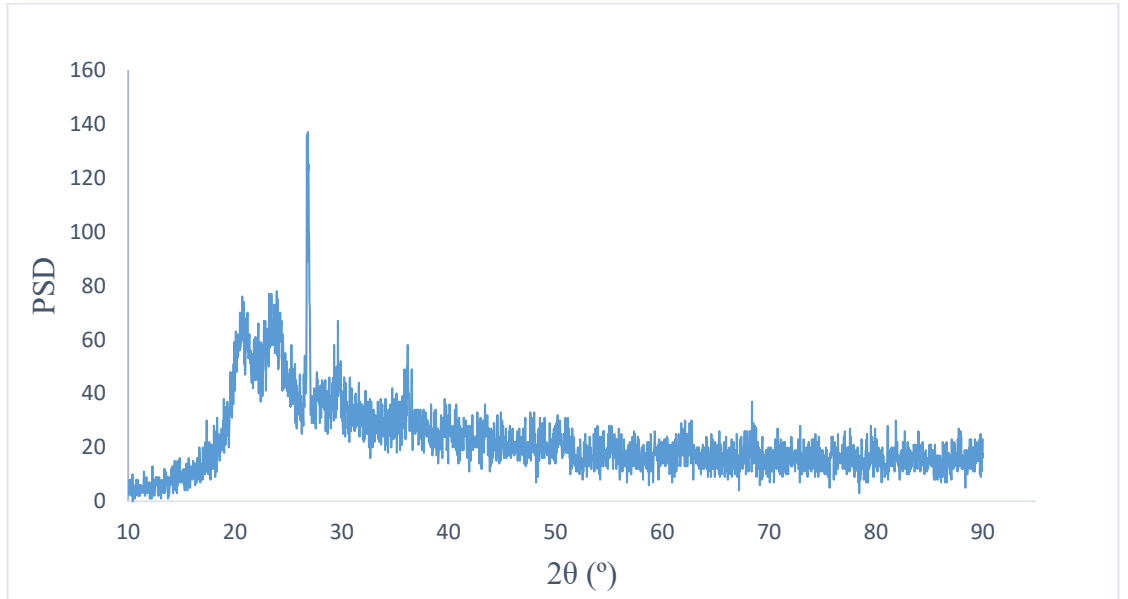
XRD Analizi

X-ışını kırınımı, ince taneli zemin minerallerini tanımlamak ve kristal yapılarını incelemek için en yaygın yöntemdir. Mineralojide en önemli faktör, zeminin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin olası aralığını belirlemektir. Kil mineralojisi bu sebepten ötürü zemin davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar. X-ışını kırınımı, uçucu kül ve polipropilen ile kürlenmiş killerdeki malzemeyi, reaktif bileşiklerini ve jelleri tespit etmek için kullanılır.

7 günlük kürlenme süreleri için zemin numunesi (Z) ve iyileştirilmiş zemin numunesi (ZU) numunelerinin XRD desenleri şekil 21 ve şekil 22’de sunulmaktadır. şekil 21’de XRD desenlerinden 25°/2θ ’deki ve şekil 22’de XRD desenlerinden 28°/2θ ’deki kuvars pikinin zemin numunelerinin doğasını yansıtan en keskin piki gösterdiği görülmektedir. Kuvars pikleri, artan kr süresi ile azalma eğilimindedir. Bu alışma kapsamında oluşturulan zemin numunelerinin XRD analizleri Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde X-Işını Difraktometresi cihazında yapılmıştır.



şekil 21. Zemin numunesi XRD analizi



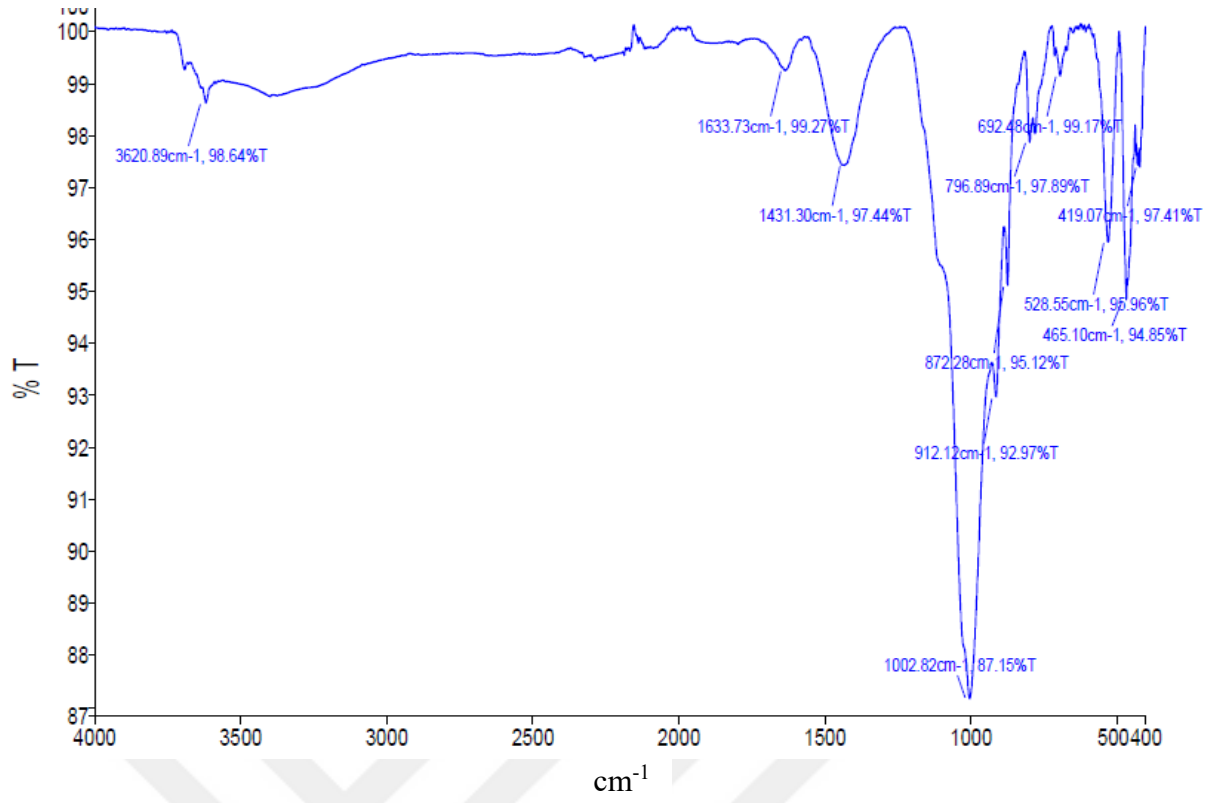
şekil 22. İyileştirilmiş zemin numunesi XRD analizi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

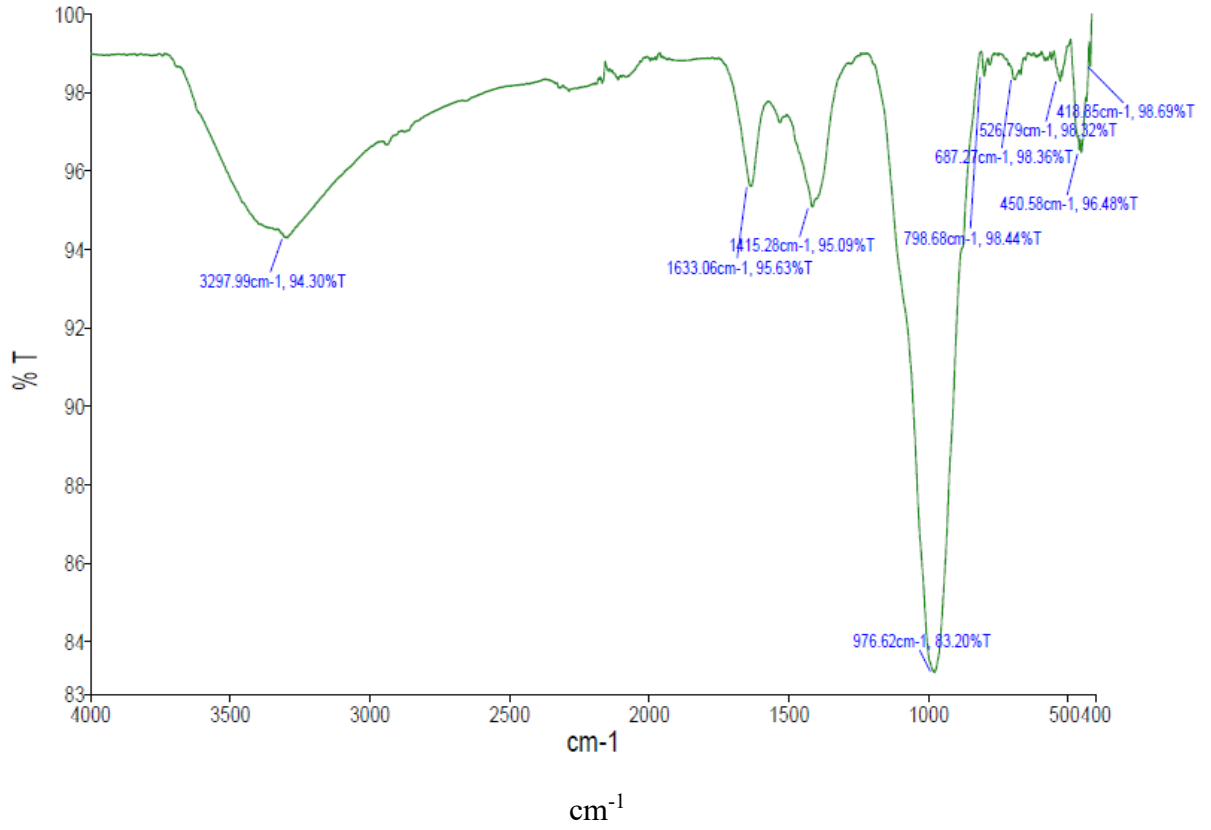
Bu çalışma kapsamında oluşturulan DKK numunelerinin FT-IR analizleri Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi cihazında yapılmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), bir tür titreşim spektroskopu olmakla birlikte; ışığın kızılötesi yoğunluğuna karşı dalga sayısını ölçmek için matematiksel Fourier dönüşüm yöntemini kullanan bir kimyasal analiz tekniğidir. Kızılötesi dalga boyu üç ana aralıktan oluşur. Elektromanyetik optik dizilerin kızılötesi aralığı; uzak kızılötesi, orta dalga kızılötesi ve yakın dalga kızılötesi aralığını içermektedir. Kızılötesi radyasyon, moleküllerin titreşim hareketi tarafından emilir. Bu yöntemde moleküler bağların karakterizasyonu yapılır. Katı, sıvı, gaz veya çözünmüş organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel grupları, iki bileşiğin aynı olup olmadığını, yapı içindeki bağlanma durumunu, bağlanma yerlerini ve yapının aromatik mi yoksa alifatik mi olduğunu belirleyebilirsiniz. FT-IR, en yaygın kullanılan malzeme karakterizasyon yöntemlerinden olup bu yöntemin avantajlı kılan bazı etkenler şu şekildedir:

- Kısa analiz süresi
- Detaylı bilgi elde edebilmek
- Analizin yapılması için sarf malzeme maliyete ihtiyaç duyulmamasıdır.

Fourier-Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri, 7 günlük kür süreleri için Şekil 23 ve Şekil 24'de gösterildiği üzere zemin numunesi ve iyileştirilmiş zemin numunesi numunelerinin kısa menzilli yapısal düzeniyle bağlarını karakterize etmek için yapılmıştır. Şekilden, yaklaşık olarak 692 cm^{-1} ve 687 cm^{-1} dalga sayısında ortalanan bir tepe noktasının Si-O-Si, Al-O-Si bağlarına atıfta bulunabileceği görülmektedir. CaCO_3 oluşumunun nedeni, kür işlemi sırasında numunelerin hava yalıtımının düzgün yapılmaması sebebiyle oluşan karbonatlaşmadan kaynaklanmaktadır. 950 cm^{-1} ve 1050 cm^{-1} dalga sayıları arasında ortaya çıkan keskin bir pik, örnekler için Si-O-Si veya Si-O-Al bandını örneklemektedir. Tüm numuneler için 1430 cm^{-1} 'de Si-O bağlantıları belirlenmiştir. 1633 cm^{-1} 'de görülen pik karbonil gruplarından kaynaklı olarak C=O çifte bağına ait titreşimleri göstermektedir. 3300 cm^{-1} ve 3621 cm^{-1} aralığında görülen geniş yayvan pik, molekülde bulunan O-H gerilme titreşimlerine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 23. Zemin numunesinin FI-TR spektrumu



Şekil 24. İyileştirilmiş zemin numunesinin FI-TR spektrumu

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler

Yapılan yüksek lisans çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Uçucu kül kullanılan zemin numunelerinde serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiş olup, yüksek oranlarda kullanımı zeminlerin mekanik özelliklerindeki iyileşme performansını düşürmektedir.
- Düşük aktivatör içeriğinde kıvam kaynaklı yerleşme problemi nedeniyle malzeme içerisinde büyük boşlukların kalması, yüksek aktivatör içeriğinde ise malzemenin aşırı akışkan olması dayanım kayıplarının sebebini oluşturmaktadır.
- Doğal zemine yanıt yüzey yöntemine göre sabit oranlarda aktivatör ve uçucu kül katılırken, farklı oranlarda polipropilen lif (% 0,5, % 0,75, %1, %1,25, % 1,5, %2) ilave edilmiş olup en yüksek dayanım %1,5 polipropilen lif kullanılan zemin numunelerinden elde edilmiştir. Polipropilen lif kullanılan numunelerde, kullanılmayan numunelere göre basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir.
- Serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar, 7 ve 28 günlük kür sonunda sıcaklık artışının numunelerin dayanımını arttırdığını ortaya koymaktadır. Sıcaklığın ve kür süresinin artmasıyla dayanım ve kohezyon değerleri artarken, içsel sürtünme açısı değerleri azalmıştır.
- Farklı polipropilen lif miktarlarıyla yapılan deneyler sonucunda zayıf işlenebilirliğin ana nedeni, lif miktarı arttıkça zeminin daha düşük akışkanlığına ve harcın daha düşük viskozitesine neden olan topaklaşmayı meydana getirmesidir.

Yapılan tez çalışmasının ardından yapılabilecek araştırmalar için verilebilecek öneriler aşağıdaki gibidir.

- Yapılan çalışma kapsamı durabilite, geçirimsizlik ve şişme gibi deneylerle genişletilebilir.
- Farklı yapı ve uzunlukta polipropilen lifler kullanılabilir ve zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Alataş, T., (1996). *Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma*, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enst. , 146 S., Elazığ (Doktora Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 50970)
- Aksoy H.S., İçen A. (2020), Homojen Kum Zeminlerde Optimum İyileştirme Derinliğinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi* 9 (3), 1210-1218
- Ceylan, G. (2011), *Deep Soil Improvement Methods*, Institute of Science and Technology İstanbul Technical University
- Balcı (2018), *High Volume Fly Ash Concretes For Sustainable Applications in Construction*, Bogazici University, (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 76522)
- Fidan, D. (2016), *Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi*, Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 444951)
- Dağlı, E. Çapar (2021), Ö.F. Evaluation Of The Bearing Capacity of Shallow Strip Foundations Resting on Sandy Soils With Analytical and Numerical Methods. *Celal Bayar University Journal of Science, Volume 1, Issue 17, 2021, p 91-100*
- Danishyar, F. (2021), *Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Kompozit Malzeme Özelliklerine Polipropilen Lif Katkısının Etkisi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 677716)
- Gençoğlu, E.(2022), Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Dane Boyutunun Cbr ve Dayanıma Etkisi, Bayburt Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 714259)
- Görhan, G.(2020), Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 20, 015601 (83-89)
- Kamiloğlu, H.A. Turan H. (2021), Farklı Kür Sıcaklıklarında Kireçle Stabilize Edilmiş Yüksek Plastisiteli Killi Bir Zeminin Kayma Mukavemeti Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) İle Tahmini, *Pamukkale Uni. Müh. Bilim Dergisi*, 27(6), 711-717
- Kaptan E.C., Çınar F.T., Bozbey İ. (2021), Derin Karıştırma Yöntemi (Dsm) İle İyileştirilen Zeminlerde Elastisite Modülü ve Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi, *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg.* 2021, 29(3), 286-296
- Kılıç, H. O. (2013), *Derin Karıştırma Yöntemi Tasarım ve Uygulaması*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 334855)
- Küçük, F., (2021), *Yüksek Performanslı Polipropilen Fiber Katkısının Kil Zeminin Drenajsız Kayma Direncine Etkisinin İncelenmesi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 674761)

- Kwan, P. S., Bouazza, A., Fletcher, P., & Ranjith, P. G. (2005). Behaviour of Cement Treated Melbourne and Southeast Queensland Soft Clays in Deep Stabilization Works, *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances* (Pp. 100-110).
- Masike, N. (2019), *Silis Dumanı İlaveli Derin Karıştırma Kolonlarının Üç Eksenli Basınç Dayanımı ve Konsolidasyon Özelliklerinin Araştırılması*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 576789)
- Mohabbi Yadollahi, M. & Varolgüneş, S. (2018). Polipropilen Liflerin Perlit Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Davranışına Etkisi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 7 (2) , 36-41.
- Najim (2021), *Effect of Polypropylene Fibers and Diatomite on Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Exposed to Elevated Temperatures*. Gaziantep University Graduate School of Natural & Applied Sciences
- Özen, G. (2018), *Yapılarda Uygulanan Zemin İyileştirme ve Geoteknik Çalışmaların Değerlendirilmesi*, İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler Mühendisliği (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 520760)
- Öztürk Yarar, D. (2021), *Polipropilen Lif İle Güçlendirilmiş Köpük Betonlarda Taban Külünün Hafif Agregası Olarak Kullanımının Araştırılması*, Kastamonu Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 683974)
- Pekdemir (2020), Poli Manyetik Nanopartikül Kompozitlerinin Sentezi, Termal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering* 20 051202 (802-809)
- Rasool, H. (2022), *Fresh and Hardened Properties of Rubberized Fly Ash Based Geopolymer Composite*, Harran University Graduate School of Applied and Natural Science (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 709339)
- Ranjbar N., Ghadir, P (2018), “Clayey Soil Stabilization Using Geopolymer and Portland Cement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 188, Pp. 361-371.
- Soysal, H.M. (2022), *Eksenel Yük Uygulanan Derin Karıştırma Kolonlarının Farklı Yöntemler İle Elde Edilen Taşıma Gücü Değerlerinin Kıyaslanması*. İstanbul Aydın Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 709498)
- Şahbaz, İ. (2020), *Çimento ve Polipropilen Lif Kullanarak Killi Zeminlerin İyileştirilmesi*, Bursa Uludağ Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 683073)
- Şengör, M.Y. (2011), *The Deformation Characteristics of Deep Mixed Columns in Soft Clayey Soils a Model Study*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (Doktora Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 285578)
- Taki., O. (2004), Strength Properties of Soil Cement Produced by Deep Mixing. *Proceedings From Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*. 646-657. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)36](https://doi.org/10.1061/40663(2003)36)

- Topçu, İ. B. , Demirel, O. E. & Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri . *Politeknik Dergisi* , 20 (1) , 91-96 .
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., (2009), Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Rapor No: Y03.03, Ankara.*
- Türköz M.,Savaş H., Tosun H. (2010), Problemlı Kil Zeminlerin Magnezyum Klorür Solüsyonu İle İyileştirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 26, No 1, 233-242, 2011*
- Uçar (2022), *İki Farklı Polipropilen Lifin Rijit Kaplamalarda Hibrit Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Atatürk Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 683073)
- Ural N., Kut Ü., Gülsevinç N.(2020), Atık PVC ile Zemin İyileştirme, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 7, No: 3, (1471-1481)*
- Uzuner., (2016),, Introduction to Foundation Engineering- No. 1:27-441
- Wahidy, M. (2019), Derin Karıştırma Kolonlarının Performansı Üzerinde Farklı Özellikteki Çimentoların Etkilerinin Araştırılması, Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 547819)
- Yaprak, H. & Karacı, A. (2009). Polipropilen Lifli Betonların Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımlarının Yapay Ağları ile Tahmini. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 1 (2) , 23-28*
- Yıldız, İ. (2022), *Derin Karıştırma Kolonları İle Güçlendirilmiş Dolguların İki ve Üç Boyutlu Sayısal Analizleri*, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 712614)
- Yılmaz F. (2016), Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı, *3rd International Symposium on Environment an Morality, Alanya, Türkiye, 1175-1181.*

ÖZGEÇMİŞ

Büşra Avlayan yılında Malatya’da doğdu. İlk ve ortaokul öğrenimini Malatya Yakınca İlkokulu’nda tamamladı. Lise öğrenimini yılları arasında Beydağı Abdülkadir Eriş Anadolu Lisesi’nde tamamladı. yılında Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girmeye hak kazanıp yılında inşaat mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2019 yılında Bayburt Üniversitesi’nde lisansüstü eğitimine başladı.

