

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOLGULARDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME
KULLANIMININ DONMA ÇÖZÜLME DAVRANIŞINA
ETKİLERİ

Hazal Berrak GENÇDAL

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGULARDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME
KULLANIMININ DONMA ÇÖZÜLME DAVRANIŞINA
ETKİLERİ**

Hazal Berrak GENÇDAL tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Pelin ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İlknur BOZBEY, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Doç. Dr. Esra Ece BAYAT, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Dolgularda Faz Değıştiren Malzeme Kullanımının Donma Çözölme Davranışına Etkileri” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğler kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hazal Berrak GENÇDAL

İmza



Bu alışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2022-504” numaralı projesi, “İstanbul Kültür Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün BAP-2206” numaralı projesi ve “Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu’nun 223M014” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

2013 yılından bugüne kadar geçen on yılı aşkın süre boyunca, gerek Yüksek Lisans gerek Doktora tez sürecimde desteği, anlayışı, yönlendirmesi, ilgisi, motivasyonu ve yapmış olduğu rehberlik ile bana her zaman maddi ve manevi destek olan tez danışmanım çok sevgili Prof. Dr. Havvanur KILIÇ'a en derin şükranlarımı ve sonsuz sevgilerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince, tez ara rapor sunumlarımda yararlı ve yapıcı eleştiri ile sundukları değerli öneriler ve yönlendirmeler için tez izleme komitesinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Pelin ÖZENER ve Prof. Dr. İlknur BOZBEY'e ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tez sürecimde bana destek olan, vermiş oldukları öneri, her türlü destek ve moral için Dr. Emre AKINAY'a, tezimin sayısal modelleme kısmında her türlü bilgiyi benimle paylaşan Dr. Ahmet Can MERT'e, tez yazım sürecindeki desteklerini her zaman üzerimde hissettiren ve moral veren Arş. Gör. Oğuz EMİR'e ayrıca teşekkür ederim. Desteklerinden dolayı kendilerine minnettarım.

Bu zorlu süreçte desteğini bir an olsun esirgemeyen, her şeyin yoluna gireceği yönünde inancımı hep taze tutan, hayatım boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda bana her zaman destek olan, güç veren ve her zaman ayaklarımın üstümde durmamı sağlayıp benim bu günlere gelmemi sağlayan, borçlarını asla ödeyemeyeceğim, canımdan çok sevdiğim biricik annem Şenay'a, babam Ali'ye ve abim Murtaza Burak'a çok teşekkür ederim.

Son olarak, bu sancılı sürecin her anını benimle büyük bir destek ile paylaşan, hayat arkadaşım Melih'e duyduğum şükran duygusunu ifade etmek için sözcüklerin yeterli olabileceğini düşünmüyorum. Bu zorlu yolda göstermiş olduğu arkadaşlık, dostluk, sevgi, cesaret, sabır, destek, moral ve büyük bir anlayış için teşekkür ediyorum. Onların desteği olmadan bu tezi tamamlamam mümkün olamazdı.

Haziran, 2024

Hazal Berrak GENÇDAL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xxii
ABSTRACT	xxiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Donma Çözülme (DÇ)	1
1.1.1 Donma Çözülme Çevrimlerinin Dane Boyutuna Etkisi.....	2
1.1.2 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Mukavemetine Etkisi.....	5
1.1.3 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Hidrolik İletkenliğine Etkisi.....	7
1.1.4 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Sıkışabilirliğine Etkisi...	10
1.1.5 Donma Çözülme Çevrimlerinin Olumsuz Etkileri İçin Yapılan İyileştirme Çalışmaları.....	11
1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM).....	12
1.2.1 FDM Uygulama Teknikleri.....	19
1.2.2 FDM Kullanım Alanları.....	21
1.2.3 FDM Termal Özelliklerinin Belirlenmesi.....	21
1.2.4 FDM Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	23
2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
2.1. Zemin	67
2.1.1 Numune Hazırlama.....	71
2.2. Faz Değiştiren Malzeme (FDM).....	89
3 MUKAVEMET DAVRANIŞI	101
3.1 Serbest Basınç Deneyleri	101
4 SIKIŞABİLİRLİK ve HİDROLİK İLETKENLİK DAVRANIŞI	142
4.1 Tek Boyutlu Ödometre Deneyleri.....	142

4.2 Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleri	163
5 MİKRO-YAPI ANALİZLERİ	172
5.1 Termal Analizler	172
5.2 Elementel Analizler	175
5.3 Görüntü Analizleri	179
5.4 Sıcaklık Analizleri (Thermocouple Ölçümleri)	200
6 DENEYSEL SONUÇLAR	204
7 MODEL DENEYLER ve SAYISAL MODELLEME	230
7.1 Model Deneyler	230
7.2 Model 1 ve Model 2'nin Plaxis2D Yazılımında Sayısal Modellemesi.....	245
7.3 Model 3 ve Model 4'ün Plaxis2D Yazılımında Sayısal Modellemesi.....	252
8 SONUÇ	270
KAYNAKÇA	274
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	295

SİMGE LİSTESİ

e	Boşluk Oranı
T_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
ρ_s	Dane Yoğunluğu
d	Derinlik
σ_n	Donma Çözülme Çevrimine Maruz Kalan Zeminin Serbest Basınç Mukavemeti
σ_0	Donma Çözülme Çevrimine Maruz Kalmayan Zeminin Serbest Basınç Mukavemeti
n	Donma Çözülme Çevrim Sayısı
σ_v'	Düşey Efektif Gerilme
E	Elastisite Modülü
$\varepsilon_{göçme}$	Göçme Şekil Değiştirmesi
ΔV	Hacim Değişimi
λ_s	Isı İletkenliği
α_{sv}	Isı Yayılımı
φ	İçsel Sürtünme Açısı
c	Kohezyon
c_v	Konsolidasyon Katsayısı
ρ_k	Kuru yoğunluk
w_L	Likit Limit
LL	Likit Limit
$\gamma_{kmax.}$	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\rho_{kmax.}$	Maksimum Kuru Yoğunluk
$\varepsilon_{max.}$	Maksimum Şekil Değiştirme
$\rho_{kmaxmodifiye}$	Modifiye Kompaksiyon Enerjisi ile Elde Edilen Maksimum Kuru Yoğunluk
$w_{optmodifiye}$	Modifiye Kompaksiyon Enerjisi ile Elde Edilen Optimum su Muhtevası
w_{opt}	Optimum Su Muhtevası
c_s	Özgül Isı Kapasitesi
k	Permeabilite Katsayısı
w_p	Plastik Limit
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite İndeksi
ν	Poisson Oranı
q_u	Serbest Basınç Mukavemeti
$\rho_{kmaxstandart}$	Standart Kompaksiyon Enerjisi ile Elde Edilen Maksimum Kuru Yoğunluk
λ	Sıkışma Eğrisinin Eğimi
C_c	Sıkışma İndisi
$w_{optstandart}$	Standart Kompaksiyon Enerjisi ile Elde Edilen Optimum su Muhtevası
ε	Şekil Değiştirme
κ	Şişme Eğrisi Eğimi
C_s	Şişme İndisi

KISALTMA LİSTESİ

B-PCM	Bütil Stearate Çekirdek Malzemeli PCM
CC	Cam Clay
CH	Yüksek Plastisiteli Kil Zemin
CL	Düşük Plastisiteli Kil Zemin
COV	Değişim Katsayısı (Coefficient of Variation)
CPCM	Kompozit Faz Değiştiren Malzeme
DÇ	Donma Çözülme
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimeters)
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spektrofotometre)
HS	Hardening Soil
ICP-MS	İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi
K	Donma Önleme (Antifriz) Performans Parametresi
MC	Mohr-Coulomb
MF	Melamine Formaldehide
mFDM	Mikrokapsüllü Faz Değiştiren Malzeme
MH	Yüksek Plastisiteli Killi Silt Zemin
ML	Düşük Plastisiteli Silt Zemin
mPCM	Microencapsulated Phase Change Material
OFDM	Organik Faz Değiştiren Malzemeler
pFDM	Likit Faz Değiştiren Malzeme
pPCM	Likit Phase Change Material
PCM	Phase Change Material
P-PCM	Parafin Çekirdek Malzemeli PCM
PEG	Polietilen Glikoller
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SS	Soft Soil
TED	Termal Enerji Depolama
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi

XRD	X-Işını Difraktometresi
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 FDM çalışma prensibi (Waqas vd. (2018))	14
Şekil 1.2 FDM'lerin sınıflandırılması (Sharma vd. (2007))	16
Şekil 1.3 Kapsül sınır boyutları (Özonur (2004))	20
Şekil 1.4 Mikrokapsülleme işlemi (Kut (2023))	20
Şekil 1.5 DSC analiz sonucu	22
Şekil 1.6 DSC analiz sonuçları (Mahedi vd. (2019))	27
Şekil 1.7 Kompaksiyon davranışına FDM (PCM) etkisi (Mahedi vd. (2019))	29
Şekil 1.8 Atterberg limitlerine FDM (PCM) etkisi (Mahedi vd. (2019))	29
Şekil 1.9 q_u -PCM çevrim ilişkisi (Mahedi vd. (2019))	30
Şekil 1.10 Sıcaklık ölçümleri (Mahedi vd. (2019))	30
Şekil 1.11 Su muhtevasının derinlik ile değişimi (Mahedi vd. (2019))	31
Şekil 1.12 DSC analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2020))	32
Şekil 1.13 Sıcaklık ölçümleri (Kravchenko vd. (2020))	32
Şekil 1.14 SEM analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2020))	33
Şekil 1.15 SEM ve XPS analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2021))	34
Şekil 1.16 DSC analiz sonuçları-DÇ öncesi (Rao vd. (2021))	35
Şekil 1.17 FT-IR analiz sonuçları (Rao vd. (2021))	35
Şekil 1.18 SEM analiz sonuçları (Rao vd. (2021))	36
Şekil 1.19 q_u - ε ilişkisi (Rao vd. (2021))	37
Şekil 1.20 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Rao vd. (2021))	37
Şekil 1.21 K-DÇ çevrim ilişkisi (Rao vd. (2021))	38
Şekil 1.22 SEM analiz sonuçları-DÇ sonrası (Rao vd. (2021))	38
Şekil 1.23 Deney öncesi görseller (Rao vd. (2021))	39
Şekil 1.24 Sıcaklık ölçümleri (Rao vd. (2021))	39
Şekil 1.25 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2021))	40
Şekil 1.26 q_u - ε ilişkisi (Chen vd. (2021))	40
Şekil 1.27 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))	41
Şekil 1.28 $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))	41
Şekil 1.29 SEM analiz sonuçları-DÇ sonrası (Chen vd. (2021))	42
Şekil 1.30 Deney sonrası görseller (Chen vd. (2021))	42
Şekil 1.31 Hacim değişim hesabı (Lu vd. (2019))	43
Şekil 1.32 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))	43

Şekil 1.33 DSC analiz sonuçları (Liu vd. (2021))	44
Şekil 1.34 Kompaksiyon davranışına FDM (PCM) etkisi (Liu vd. (2021)).....	44
Şekil 1.35 Atterberg limitlerine FDM (PCM) etkisi (Liu vd. (2021)).....	45
Şekil 1.36 k-PCM ilişkisi (Liu vd. (2021)).....	45
Şekil 1.37 Sıcaklık ölçümleri (Liu vd. (2021)).....	46
Şekil 1.38 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2022))	47
Şekil 1.39 q_u -PCM ilişkisi (Chen vd. (2022))	47
Şekil 1.40 q_u - ε ilişkisi (Chen vd. (2022))	48
Şekil 1.41 $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2022)).....	48
Şekil 1.42 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2022))	48
Şekil 1.43 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2023))	49
Şekil 1.44 q_u -PCM ilişkisi (Chen vd. (2023))	50
Şekil 1.45 q_u - ε ilişkisi (Chen vd. (2023))	50
Şekil 1.46 $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2023)).....	51
Şekil 1.47 Deney sonrası görseller (Chen vd. (2023))	51
Şekil 1.48 ΔV -DÇ çevrim donma ilişkisi (Chen vd. (2023))	52
Şekil 1.49 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2023))	52
Şekil 1.50 DSC analiz sonuçları (Luo vd. (2023))	53
Şekil 1.51 FT-IR analiz sonuçları (Luo vd. (2023))	53
Şekil 1.52 q_u -DÇ-FDM ilişkisi (Luo vd. (2023))	55
Şekil 1.53 q_u - ε ilişkisi (Luo vd. (2023))	55
Şekil 1.54 SEM analiz sonuçları (Luo vd. (2023)).....	56
Şekil 1.55 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi (Luo vd. (2023))	56
Şekil 1.56 q_u - ε ilişkisi (Guo vd. (2024)).....	57
Şekil 1.57 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Guo vd. (2024)).....	57
Şekil 2.1 Türkiye iklim durumu (Karabulut (2018))	65
Şekil 2.2 Çalışma kapsamında kullanılan zemin	67
Şekil 2.3 Zemine ait dane çapı dağılım eğrisi	68
Şekil 2.4 Zemine ait kompaksiyon eğrileri.....	68
Şekil 2.5 XRD ve XRF analiz sonuçları.....	69
Şekil 2.6 Zemin dane çapı dağılımı-don hassasiyeti ilişkisi (Beskow (1935))	70
Şekil 2.7 İnce dane oranı-donma kabarma hızı (Tester ve Gaskin (1992)).....	70
Şekil 2.8 Mineral türü-donma kabarması ilişkisi (Brandl (2008))	71
Şekil 2.9 Numune hazırlama prosedürü	72
Şekil 2.10 Serbest basınç deneyleri için numune alımı	74

Şekil 2.11 Serbest basınç deneyleri için hazırlanan deney numuneleri.....	75
Şekil 2.12 Donma çözülme kabini.....	75
Şekil 2.13 Donma çözülme çevrim koşulları.....	76
Şekil 2.14 Serbest basınç deney sonuçları (wopt)	77
Şekil 2.15 Serbest basınç deney sonuçları (wopt+%2).....	78
Şekil 2.16 Serbest basınç deney sonuçları (wopt+%5).....	79
Şekil 2.17 Deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (wopt)	81
Şekil 2.18 Deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (wopt+%2).....	81
Şekil 2.19 Modifiye kompaksiyon enerjisi etkisi	82
Şekil 2.20 Modifiye kompaksiyon enerjisi ile numune alımı.....	83
Şekil 2.21 Serbest basınç deney sonuçları (wopt)	83
Şekil 2.22 Serbest basınç deney sonuçları (wopt+%2).....	84
Şekil 2.23 Serbest basınç deney sonuçları (wopt+%5).....	85
Şekil 2.24 FDM formları	89
Şekil 2.25 Mikrokapsüllenmiş FDM (mFDM) teslim alınması	90
Şekil 2.26 DSC analiz sonuçları-likit FDM.....	91
Şekil 2.27 DSC analiz sonuçları-mFDM.....	92
Şekil 2.28 mFDM'nin dane boyut dağılımı.....	94
Şekil 2.29 mFDM ve zeminin dane boyu görselleri.....	94
Şekil 2.30 P0, P5, P8, P10 ve P12 likit limit deney sonuçları.....	97
Şekil 2.31 P0, P5, P8, P10 ve P12'nin Casagrande kartındaki konumları	98
Şekil 2.32 Kompaksiyon adımları	99
Şekil 2.33 Kompaksiyon deney eğrileri	99
Şekil 3.1 P0 için q_u - ε ilişkisi.....	102
Şekil 3.2 P5 için q_u - ε ilişkisi.....	102
Şekil 3.3 P8 için q_u - ε ilişkisi.....	103
Şekil 3.4 P10 için q_u - ε ilişkisi.....	103
Şekil 3.5 P12 için q_u - ε ilişkisi.....	104
Şekil 3.6 q_u - ε ilişkisi (Çevrimsiz ve 1. çevrim).....	105
Şekil 3.7 q_u - ε ilişkisi (3. çevrim ve 5. çevrim)	105
Şekil 3.8 q_u - ε ilişkisi (7. çevrim ve 9. çevrim)	105
Şekil 3.9 q_u - ε ilişkisi (11. çevrim)	106
Şekil 3.10 P0 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi.....	108
Şekil 3.11 P5 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi.....	108
Şekil 3.12 P8 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi.....	109

Şekil 3.13 P10 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi.....	109
Şekil 3.14 P0 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi	110
Şekil 3.15 P5 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi	111
Şekil 3.16 P8 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi	111
Şekil 3.17 P10 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi	112
Şekil 3.18 Deney numunelerinin desikatörde bekletilmesi	113
Şekil 3.19 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	114
Şekil 3.20 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	114
Şekil 3.21 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	115
Şekil 3.22 P10 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	115
Şekil 3.23 P12 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	115
Şekil 3.24 mFDM-zemin homojen karışımı görüntüleri	116
Şekil 3.25 Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri.....	118
Şekil 3.26 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi.....	119
Şekil 3.27 Malzeme kaybı görseli	119
Şekil 3.28 Hacim değişimi hesabı (Lu vd. (2019)).....	120
Şekil 3.29 P0 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi.....	121
Şekil 3.30 P5 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi.....	122
Şekil 3.31 P8 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi.....	123
Şekil 3.32 P10 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi.....	123
Şekil 3.33 P0 için q_u - ε ilişkisi (uzun süreli koşullar)	125
Şekil 3.34 P5 için q_u - ε ilişkisi (uzun süreli koşullar)	125
Şekil 3.35 P8 için q_u - ε ilişkisi (uzun süreli koşullar)	126
Şekil 3.36 P10 için q_u - ε ilişkisi (uzun süreli koşullar)	126
Şekil 3.37 1. grup için q_u - ε ilişkisi.....	127
Şekil 3.38 2. grup için q_u - ε ilişkisi.....	128
Şekil 3.39 3. grup için q_u - ε ilişkisi.....	128
Şekil 3.40 P0 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar).....	130
Şekil 3.41 P5 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar).....	130
Şekil 3.42 P8 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar).....	131
Şekil 3.43 P10 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar).....	131
Şekil 3.44 P0 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)	132
Şekil 3.45 P5 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)	132
Şekil 3.46 P8 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)	133

Şekil 3.47 P10 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)	134
Şekil 3.48 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)	135
Şekil 3.49 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)	135
Şekil 3.50 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)	135
Şekil 3.51 P10 deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)	135
Şekil 3.52 Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri (uzun süreli koşullar)	137
Şekil 3.53 Dane kaybı miktarı-DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)	138
Şekil 3.54 P0 için ΔV (uzun süreli koşullar)	139
Şekil 3.55 P5 için ΔV (uzun süreli koşullar)	140
Şekil 3.56 P8 için ΔV (uzun süreli koşullar)	140
Şekil 3.57 P10 için ΔV (uzun süreli koşullar)	141
Şekil 4.1 Tek boyutlu ödometre deney ringi	142
Şekil 4.2 Tek boyutlu ödometre deneyleri için numune alımı	143
Şekil 4.3 P0 için $\Delta H/H - \sigma_v'$ ilişkisi (ön deneyler)	144
Şekil 4.4 Tek boyutlu ödometre deneyleri için deney numuneleri	145
Şekil 4.5 P0 için $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi	146
Şekil 4.6 P0 için $e - \log(\sigma_v')$ ilişkisi	146
Şekil 4.7 P5 için $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi	147
Şekil 4.8 P5 için $e - \log(\sigma_v')$ ilişkisi	147
Şekil 4.9 P8 için $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi	148
Şekil 4.10 P8 için $e - \log(\sigma_v')$ ilişkisi	148
Şekil 4.11 P10 için $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi	149
Şekil 4.12 P10 için $e - \log(\sigma_v')$ ilişkisi	149
Şekil 4.13 $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi (Çevrimsiz ve 1 çevrim)	150
Şekil 4.14 $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi (3 çevrim ve 5 çevrim)	151
Şekil 4.15 $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi (7 çevrim ve 9 çevrim)	152
Şekil 4.16 $\Delta H/H - (\sigma_v')$ ilişkisi (11 çevrim)	153
Şekil 4.17 P0 için $\Delta H/H - DÇ$ çevrim ilişkisi	155
Şekil 4.18 P5 için $\Delta H/H - DÇ$ çevrim ilişkisi	156
Şekil 4.19 P8 için $\Delta H/H - DÇ$ çevrim ilişkisi	156
Şekil 4.20 P10 için $\Delta H/H - DÇ$ çevrim ilişkisi	157
Şekil 4.21 Deney numunelerinin desikatörde bekletilmesi	158

Şekil 4.22 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	158
Şekil 4.23 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	159
Şekil 4.24 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	159
Şekil 4.25 P10 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler.....	159
Şekil 4.26 mFDM-zemin homojen karışım görüntüleri	160
Şekil 4.27 Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri.....	161
Şekil 4.28 Dane kaybı miktarı-DÇ çevrim ilişkisi	162
Şekil 4.29 Çevrimler sonunda hasar gören numuneler.....	163
Şekil 4.30 Permeabilite deney hücreleri	163
Şekil 4.31 Permeabilite deneylerinde vakum uygulanması-doyurma aşaması....	164
Şekil 4.32 Düşen seviyeli permeabilite düzeneği.....	164
Şekil 4.33 P0 için k-zaman ilişkisi.....	166
Şekil 4.34 P5 için k-zaman ilişkisi	166
Şekil 4.35 P8 için k-zaman ilişkisi	167
Şekil 4.36 P10 için k-zaman ilişkisi	167
Şekil 4.37 P0, P5, P8 ve P10 için k-zaman ilişkisi.....	168
Şekil 4.38 mFDM-k ilişkisi	168
Şekil 4.39 mFDM-deney süresi ilişkisi	169
Şekil 4.40 Su muhtevası-derinlik ilişkisi.....	171
Şekil 5.1 DSC analiz adımları	173
Şekil 5.2 P10 için DSC analiz sonucu	174
Şekil 5.3 FT-IR analiz adımları.....	176
Şekil 5.4 P10, mFDM ve zemin için FT-IR analiz sonucu.....	177
Şekil 5.5 Zemin için SEM analiz sonuçları	179
Şekil 5.6 SEM analiz adımları.....	180
Şekil 5.7 mFDM için SEM analiz sonuçları.....	181
Şekil 5.8 P10 için SEM analiz sonuçları	181
Şekil 5.9 Micro CT analizleri yapımı	184
Şekil 5.10 P0-0 zemin 3D görüntüsü.....	184
Şekil 5.11 P0-0 zemin boy kesiti 3D görüntüleri	185
Şekil 5.12 P0-0 zemin en kesiti 3D görüntüleri.....	186
Şekil 5.13 P0-11 zemin 3D görüntüsü.....	187
Şekil 5.14 P0-11 zemin boy kesiti 3D görüntüleri	187
Şekil 5.15 P0-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri.....	189
Şekil 5.16 P10-0 zemin 3D görüntüsü.....	191

Şekil 5.17 P10-0 zemin boy kesiti 3D görüntüleri	192
Şekil 5.18 P10-0 zemin en kesiti 3D görüntüleri.....	193
Şekil 5.19 P10-11 zemin 3D görüntüsü.....	195
Şekil 5.20 P10-11 zemin boy kesiti 3D görüntüleri	196
Şekil 5.21 P10-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri.....	197
Şekil 5.22 Dane ve boşluk hacimleri	199
Şekil 5.23 Thermocouple cihazı	201
Şekil 5.24 Thermocouple aparatları.....	201
Şekil 5.25 Sıcaklık ölçüm sonuçları.....	202
Şekil 6.1 Atterberg limiti-mFDM ilişkisi	205
Şekil 6.2 q_u (kPa)-DÇ çevrim ilişkisi.....	211
Şekil 6.3 q_u (kPa)-mFDM (%) ilişkisi	212
Şekil 6.4 $\varepsilon_{(göçme)}$ -DÇ çevrim ilişkisi.....	214
Şekil 6.5 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi	215
Şekil 6.6 Kısa ve uzun süreli serbest basınç deney sonuçları.....	220
Şekil 6.7 $K - DÇ$ çevrim ilişkisi.....	221
Şekil 6.8 $\Delta H/H$ -DÇ çevrim ilişkisi	222
Şekil 6.9 $\Delta H/H$ -DÇ ilişkisi	224
Şekil 6.10 k -DÇ ilişkisi	227
Şekil 7.1 Model deneylerde kullanılan plexiglass ve yükleme ağırlığı.....	231
Şekil 7.2 Sınır şartları (Brinkgreve (2005)).....	231
Şekil 7.3 Model deneyler için malzeme hazırlanması	232
Şekil 7.4 Kompaksiyon adımları	233
Şekil 7.5 Numunelerin donma çözülme çevrimlerine hazır hale getirilmesi	234
Şekil 7.6 Yükleme adımları	234
Şekil 7.7 Model 1 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler	235
Şekil 7.8 Model 2 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler	236
Şekil 7.9 Model 3 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler	237
Şekil 7.10 Model 4 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler	238
Şekil 7.11 Su muhtevası – derinlik ilişkisi	239
Şekil 7.12 Sıcaklık ölçümleri-model deneyler	240
Şekil 7.13 Sıcaklık ölçüm sonuçları-model deneyler	241
Şekil 7.14 Model 1 ve Model 3 için yük-boy kısalması ilişkisi	242
Şekil 7.15 Model 2 ve Model 4 için yük-boy kısalması ilişkisi	243

Şekil 7.16 Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 için yük-boy kısalması ilişkisi	243
Şekil 7.17 Plaxis2D model tipi ve sınırları.....	245
Şekil 7.18 Plaxis2D zemin özellikleri ve malzeme modelleri-Model 1 ve Model 2	246
Şekil 7.19 Plaxis2D temel-plaka özellikleri	247
Şekil 7.20 Model 1 için malzeme parametreleri.....	249
Şekil 7.21 Model 2 için malzeme parametreleri.....	251
Şekil 7.22 Plaxis2D zemin özellikleri ve malzeme modelleri-Model 3 ve Model 4	252
Şekil 7.23 Model 3 ve Model 4 için Initial phase.....	254
Şekil 7.24 Model 3 ve Model 4 için Phase 1	255
Şekil 7.25 Model 3 ve Model 4 için Phase 2	256
Şekil 7.26 Model 3 ve Model 4 için Phase 3	257
Şekil 7.27 Model 3 için model ve Plaxis 2D sıcaklık ölçüm sonuçları	259
Şekil 7.28 Model 4 için model ve Plaxis 2D sıcaklık ölçüm sonuçları	259
Şekil 7.29 Model 3 için malzeme parametreleri.....	261
Şekil 7.30 Model 4 için malzeme parametreleri.....	262
Şekil 7.31 Model 1 ve Model 3 sonuçlar.....	262
Şekil 7.32 Model 2 ve Model 4 sonuçlar.....	263
Şekil 7.33 Plaxis2D yol dolgusu kesiti (Mei vd. (2021))	263
Şekil 7.34 Model 1 (P0-0) için yol dolgusu analizleri.....	264
Şekil 7.35 Model 1 (P0-0) için yol dolgusu analizleri.....	264
Şekil 7.36 Model 2 (P10-0) için yol dolgusu analizleri.....	265
Şekil 7.37 Model 2 (P10-0) için yol dolgusu analizleri.....	265
Şekil 7.38 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri.....	266
Şekil 7.39 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri.....	266
Şekil 7.40 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (2. çevrim)	266
Şekil 7.41 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (6. çevrim)	266
Şekil 7.42 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (11. çevrim)	267
Şekil 7.43 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri.....	267
Şekil 7.44 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri.....	267
Şekil 7.45 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (2. çevrim)	268

Şekil 7.46 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (11. çevrim)	268



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 FDM seçim kriterleri (Anusha, 2016; Khot ve Khanwalkar, 2016; Scores, 2015; Socaciu, 2012; Utlu vd., 2013)	15
Tablo 1.2 Organik, inorganik ve ötektik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Waqas vd. (2018))	17
Tablo 1.3 Parafin olan ve parafin olmayan OFDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Bugaje, 1997; Crespoa vd., 2018; Gök vd., 2008; Sarı, 2003; Xiao vd., 2002; Velraj vd., 1998)	18
Tablo 1.4 FDM uygulama tekniklerinin avantaj ve dezavantajları (Cui vd., 2015; Farid vd., 2004; Kosny, 2015)	19
Tablo 1.5 Kompaksiyon sonuçları (Mahedi vd. (2019)).....	28
Tablo 1.6 XPS analiz sonuçları (Rao vd. (2021))	36
Tablo 1.7 Kompaksiyon sonuçları (Luo vd. (2023)).....	54
Tablo 1.8 Literatür çalışmaları	58
Tablo 1.9 DSC analizleri uygulanma koşulları	60
Tablo 1.10 DSC analiz sonuçları (özet)	61
Tablo 2.1 Çalışma kapsamında kullanılan zemin özellikleri	67
Tablo 2.2 Zeminlerin don hassasiyeti (Chamberlein, (1981))	69
Tablo 2.3 Numune hazırlama prosedürü	73
Tablo 2.4 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})	77
Tablo 2.5 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%2$).....	78
Tablo 2.6 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%5$).....	79
Tablo 2.7 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})	84
Tablo 2.8 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%2$).....	84
Tablo 2.9 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%5$).....	85
Tablo 2.10 Deneysel çalışma programı.....	88
Tablo 2.11 DSC analiz sonuçları	92
Tablo 2.12 İsimlendirme	96
Tablo 2.13 P0, P5, P8, P10 ve P12 deney sonuçları	97
Tablo 2.14 Kompaksiyon deney sonuçları.....	100
Tablo 3.1 P0, P5, P8, P10 ve P12 için $q_u-\epsilon_{göçme}$ değerleri.....	107
Tablo 3.2 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri	117
Tablo 3.3 P0, P5, P8, P10 için hacim değişimleri.....	121
Tablo 3.4 P0, P5, P8 ve P10 $q_u-\epsilon_{max}$ değerleri (uzun süreli koşullar)	129

Tablo 3.5 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri-uzun süreli koşullar.....	136
Tablo 3.6 P0, P5, P8, P10 için hacim değişimleri (uzun süreli koşullar).....	139
Tablo 4.1 Tek boyutlu ödometre deneylerinde yükleme ve yük boşaltma adımları	145
Tablo 4.2 P0, P5, P8, P10 için tabaka bilgisi ve $\Delta H/H$ değerleri.....	154
Tablo 4.3 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri	160
Tablo 4.4 P0, P5, P8, P10 için k değerleri.....	165
Tablo 4.5 P0, P5, P8, P10 için deney öncesi ve deney sonrası su muhtevası değerleri	170
Tablo 5.1 P10 için DSC analiz sonucu.....	174
Tablo 5.2 ICP-MS analiz sonuçları	178
Tablo 5.3 Thermocouple çalışma ve ölçüm sıcaklık değerleri	201
Tablo 6.1 k değerleri.....	227
Tablo 7.1 İsimlendirme.....	230
Tablo 7.2 Parametre (v ve E) seçimi (Budhu vd. (2010) ve Bowles vd. (1997))	248
Tablo 7.3 Parametre (ϕ') seçimi (Budhu vd. (2010))	248
Tablo 7.4 Parametre güvenilirliği (Phoon vd. (1995))	248
Tablo 7.5 Model 1 için malzeme parametreleri	249
Tablo 7.6 Model 2 için malzeme parametreleri	250
Tablo 7.7 Model 3 ve Model 4 için zemin thermal özellikleri.....	260
Tablo 7.8 Model 3 için malzeme parametreleri	260
Tablo 7.9 Model 4 için malzeme parametreleri	261
Tablo 7.10 Plaxis2D analiz sonuçları.....	268

Dolgularda Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Donma Çözülme Davranışına Etkileri

Hazal Berrak GENÇDAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Soğuk bölge ikliminde yer alan ve yılda birden fazla kez donma çözölmeye maruz kalan zeminlerin davranışı geoteknik mühendisliğinin önemli konuları arasında yer almaktadır. Bu zeminlerde yer alan yapılar, donma ve çözölme çevrimleri sonunda meydana gelen büyük zemin deformasyonları ve mukavemet kayıpları nedeniyle hasar görebilmektedir. Yapılarda meydana gelebilecek bu problemlerin azaltılması için donma çözölme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Böylece, iyileştirmeden sonra zeminin performansını donma çözölme çevrimleri boyunca koruyabilmesi sağlanmalıdır.

Bu tez çalışmasında, donma hassasiyeti ve kaolin içeriği yüksek (%89), yol dolgusu olarak kullanılacak yüksek plastisiteli killi silt (MH) bir zeminin, çekirdek malzemesi parafin-tetradekan olan mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzemelerle (mFDM) (%5, %8, %10, %12) iyileştirilmesi, farklı donma çözölme (DÇ) çevrimlerinde (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11) deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, geçirimsizlik ve mekanik özellikleri laboratuvar deneyleri ile (tek boyutlu ödometre, serbest basınç, düşen seviyeli permeabilite) incelenmiştir. Zeminin iyileştirme öncesindeki durumuna göre meydana gelen davranış değışiklikleri tespit edilmiştir. Yapılan laboratuvar deneyleri ile mFDM'nin zeminin makro (mekanik) ve mikro

(boşluk yapısı) davranışını etkilediği, mFDM oranı ile DÇ çevrim sayısı arasında önemli bir ilişki olduğu, mFDM katkısının zeminin serbest basınç mukavemetini (q_u) azalttığı, oturmasını (ΔH) arttırdığı, ancak artan DÇ çevrimlerinde zeminin mukavemetini ve oturmasını değiştirmeyerek sabit tutabildiği belirlenmiştir. mFDM katkı oranındaki artışın zeminin mukavemetini arttırdığı, oturmasını azalttığı, özellikle %10 mFDM'nin katkısız zeminin 11 DÇ çevrimin sonundaki %74'lük mukavemet kaybını %15'e indirdiği, %38'lik oturma miktarını ise %21'e indirerek en iyi iyileşmeyi sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %10 mFDM'nin en olumsuz koşul olan 11 DÇ çevrimi sonunda katkısız zeminin boşluk hacmini %7,69'dan %2,59'a azalttığı, makro ve mikro-yapıda elde edilen sonuçların birbirini desteklediği tespit edilmiştir.

%10 mFDM katkı oranı ve 11 DÇ çevrim sayısı dikkate alınarak model deney numuneleri (30cm x 30cm) üzerinde yükleme deneyleri yapılmış, elde edilen veriler ile Plaxis2D yazılımında sayısal analiz modelleri kurulmuştur. Model deney ve sayısal analizler ile zeminin DÇ davranışının incelenmesi için yapılacak olan sayısal analizlerde kullanılacak girdi (rijitlik ve termal) parametreleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Donma çözülme, yüksek plastisiteli silt zemin, faz değiştiren malzeme, mekanik davranış, Plaxis2D.

Effects of the Use of Phase Change Materials in Fillings on Freeze-Thaw Behavior

Hazal Berrak GENÇDAL

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

The behavior of soils located in cold climates and subjected to freezing and thawing more than once a year is among the important topics of geotechnical engineering. Structures located on these soils can be seriously damaged due to large soil deformations and strength losses that occur as a result of freezing and thawing cycles. In order to reduce these problems that may occur in buildings, the soils exposed to freeze-thaw cycles must be improved. Thus, after improvement, it should be ensured that the soil can maintain its performance throughout freeze-thaw cycles.

In this thesis study, a high plasticity clay silt (MH) soil with high freezing sensitivity and kaolin content (89%), to be used as road embankment, was treated with microencapsulated phase change materials (mPCM) (5%, 8%, 10%, %12), the core material of which is paraffin-tetradecane was experimentally investigated in different freeze-thaw (FT) cycles (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11). In this context, permeability and mechanical properties were examined with laboratory experiments (one-dimensional oedometer, unconfined compression, falling head permeability). Behavioral changes were determined based on comparisons made with the condition of the soil before improvement.

Laboratory experiments have shown that mFDM affects the macro (mechanical) and micro (void structure) behavior of the soil, that there is a significant relationship between the mFDM rate and the number of FT cycles, and that the mFDM contribution reduces the unconfined compressive strength (q_u) and increases settlement (ΔH) of the soil. However, it has been determined that the soil can keep its strength and settlement constant without changing in increasing FT cycles. It was determined that the increase in the mFDM additive rate increased the strength of the soil and reduced settlement. In particular, it was determined that 10% mFDM reduced the 74% strength loss of the pure soil at the end of 11 FT cycles to 15%, and provided the best improvement by reducing the settlement amount of 38% to 21%. In addition, it was determined that 10% mFDM reduced the void volume of the pure soil from 7.69% to 2.59% at the end of 11 FT cycles, which is the most unfavorable condition, and the results obtained in macro and microstructure support each other.

Loading experiments were carried out on model test samples (30cm x 30cm), taking into account the 10% mFDM rate and the number of 11 FT cycles, and numerical analysis models were established in Plaxis2D software with the obtained data. Input (stiffness and thermal) parameters to be used in the numerical analyzes to be carried out to examine the FT behavior of the soil were obtained through model experiments and numerical analyses.

Keywords: Freeze-thaw, high plasticity silt soil, phase change material, mechanical behavior, Plaxis2D.

1.1 Donma Çözülme (DÇ)

Zeminler çeşitli çevresel etkilere maruz kaldığında, anizotropik, doğrusal olmayan ve zamana bağlı bir davranış sergilemektedir (Zhang vd., 2019). Zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olan en önemli çevresel faktörlerden biri iklimdir. Zeminler, mevsimsel değişimlere bağlı olarak farklı sıcaklık ve nem koşullarına maruz kalmaktadırlar. Özellikle, soğuk iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerdeki zeminler, mevsimsel sıcaklık farklılıklarından dolayı yılda birkaç kez donma çözölmeye (DÇ) uğramaktadırlar. Bu donma çözölmeye çevrimleri, zeminin çok fazlı bir yapıya sahip olması sebebiyle, zeminin hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinde ciddi ölçüde değişim meydana getirmektedir (Ozgan vd., 2012).

Mevsimsel olarak donmuş bölgelerde kış mevsiminde hava sıcaklığının düşmesiyle birlikte, zemin yüzey sıcaklığı da kademeli olarak düşer ve zemin boşluklarındaki su (boşluk suyu) donmaya başlar. Yüzey sıcaklığı 0 Co'nin altına düştüğünde, don tabakasında buz mercekleri oluşur. Sıcaklık daha da düştükçe don tabakası hızla aşağı doğru hareket eder. Bu durum, belli bir süre sonra kılcallık ile boşluk suyunun kademeli olarak don tabakasına doğru hareket etmesine neden olur. Aynı şekilde mevsimsel olarak hava sıcaklığının arttığı dönemlerde, donmuş zemin yüzeyden itibaren erimeye başlar (Rao vd., 2021; Zhang vd., 2016).

Ortam sıcaklığı düştükçe, zemin bünyesindeki mevcut su donmakta ve buza dönüşmektedir. Donan suyun hacminde meydana gelen %9'luk artış, zemin partikülleri üzerinde gerilme yaratmakta ve zemin danelerinin ayrılmasına, parçalanmasına, zarar görmesine neden olmaktadır. Donma sürecinde meydana gelen bu olumsuz koşulu takiben çözölmeye sürecinde de, parçalanmış zemin daneleri, orjinal konumlarına yerleşme eğilimine geçmektedir. Sonuç olarak, her donma çözölmeye çevriminde meydana gelen bu olay, zemin gözeneklerinde hacim artışına ve zemin numunesinde zayıflamaya neden olmaktadır.

Donma ve çözölmeye çevrimleri sonunda, zemin tamamen eski haline dönemez ve yeni bir form kazanır. Tekrar eden donma çözölmeye çevrimleri ile birlikte meydana gelen hacim artışı, büzölmeye, eklem ve çatlaklar mikro yapıyı, mikro yapıdaki

değişimler de makro yapıyı etkiler. Sonuç olarak; zeminin fiziksel (su içeriği, dane ve boşluk yapısı) ve mekanik (hidrolik iletkenlik, mukavemet, oturma) özellikleri olumsuz yönde etkilenir (Mu vd., 2011; Othman ve Benson, 1993; Özlü, 2022; Proskin vd., 2010). Donma çözülme çevrimlerinin zeminin fiziksel ve mekanik davranışı üzerindeki etkileri, uzun zamandır çalışılan konular arasındadır. Bu başlıkta yapılan literatür çalışmaları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1.1.1 Donma Çözülme Çevrimlerinin Dane Boyutuna Etkisi

Zemin sınıfı, dane yapısı, ince dane oranı, organik madde yüzdesi, su içeriği, donma (dondurma) hızı, donma anındaki su muhtevası, donma çözülme çevrim sayısı ve donma çözülme sınır sıcaklık değerleri ile DÇ / dane stabilitesi arasındaki ilişkiler araştırmacılar tarafından incelenmiş, donma çözülme çevrim sayısının artması ile dane stabilitesinin azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları kronolojik bir sıra ile aşağıda özetlenmiştir.

- Sillanpaa ve Webber (1961), dondurucu hava koşullarında zeminin dane yapısının zayıfladığını ve önemli ölçüde bozulduğunu, buna bağlı olarak zeminin erozyona eğiliminin arttığını ortaya koymuşlardır.
- Bisal ve Nielsen (1964) de, bu konu üzerinde yapılan çalışmaları devam ettirmiş, farklı zemin türleri üzerinde deneyler yaparak donma çözülme çevrimlerinin zeminin dane yapısını bozulduğunu belirlemişlerdir. Elde ettikleri bulgular ile Sillanpaa ve Webber (1961)'in ortaya koydukları bu durumu desteklemişlerdir.
- Donma olayının neden olduğu bu olumsuz sonuç dikkate alındığında, bir zemin danesinin yağmur-su damlası darbesine karşı direncinin ana belirleyicisi olan “agrega stabilitesi” kavramı, Kemper (1965)'in yapmış olduğu çalışmalar ile ortaya çıkmıştır. Kemper (1965)'in bu çalışmaları ile, agrega stabilitesi üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkileri, farklı araştırmacılar tarafından çalışılmaya devam etmiştir.
- Benoit ve Bornstein (1970), yapmış oldukları çalışmada, 3 farklı dane boyutunda (1-2 mm, 0.5-1 mm, 0-2 mm and 2-4.8 mm), 1973 yılında yapmış oldukları çalışmada ise öncekinden farklı olacak şekilde 3 farklı dane boyutunda (0.0- 0.8 mm, 0.8-1.2 mm, and 1.2-2.0 mm) zemin kullanmış ve bu zeminler üzerinde farklı donma çözülme çevrimleri uygulayarak donma çözülmenin agrega stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla,

ilk çalışmaları olan 1970 yılında -18 C°'de ve -4 C°'de beklettikleri deney numunelerine 15 donma çözölme çevrimi, devam eden çalışmaları olan 1973 yılında ise aynı sıcaklık değerlerinde beklettikleri deney numunelerine 20 donma çözölme çevrimi uygulamışlardır. Benoit ve Bornstein, 1970 ve 1973 yıllarında yapmış oldukları bu çalışmalar ile donma çözölme çevrimlerinin zemin daneleri üzerinde parçalanma meydana getirdiğini, zemin ve danelerin yapısının donma özölmeden ciddi bir şekilde etkilendiğini göstermişlerdir.

- Russel (1973), donma olayının tüm zemin türlerinde aynı etkiyi göstermediğini, etkinin zemin yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebildiğini, kaba daneli zeminlere kıyasla ince daneli zeminlerde çok daha fazla etkisi olduğunu yapmış olduğu çalışmalar ile ortaya koymuştur.
- Chamberlain ve Gow (1979), donma ve çözölme çevrimleri sırasında ince danelerin zeminin boşluklarından çıktığını, böylece zeminin ve kayanın ana yapısının ciddi ölçüde bozulduğunu belirlemişlerdir.
- Chamberlain (1981), zeminin çözölme süreci sonundaki yapısının, donma öncesindeki yapısına göre çok daha zayıf olduğunu, bunun sebebinin danelerin çözölme olayından hemen sonra suyun tamamını yeniden emmesi olduğunu belirtmiştir.
- Voorhees (1983), donma etkisinin kuru zemine göre nemli zeminde daha belirgin olduğunu, donma boyunca zeminin su muhtevası ile danelerin stabilitesi arasında negatif bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.
- Pikul ve Allmaras (1985) ile Mbagwu ve Bazzoffi (1989)'un yapmış olduğu alışmalar, Russel (1973)'ün ortaya koyduğu bulguları destekleyici nitelikte olmuştur. Ayrıca, Pikul ve Allmaras (1985), donma çözölme çevrimine maruz kalan siltli zeminlerin diğer zeminlere göre çok daha hızlı parçalanıp yumuşak zemin formlarına dönüştüğünü yapmış oldukları deneysel çalışmalar ile belirlemişlerdir.
- Edwards ve Burney (1987), donma çözölme çevrimlerinin zeminin ağırlığında azalma meydana getirdiğini ve bu durumun zeminin yapısını olumsuz yönde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, donma çözölme çevrim sayısının artması ile meydana gelen bu hasarın arttığını, donma çözölme çevrim sayısının zemin danelerinin parçalanması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu yaptıkları deneysel çalışmalar ile ortaya koymuşlardır.

- Bullock vd. (1988), donma çözülme çevrimlerinin sonunda daneler arasındaki bağın çok zayıfladığını gözlemlemişlerdir.
- Mostaghimi vd. (1988), 3 farklı ince dane içeriğine sahip olan zemin üzerinde donma çözülme çevrimleri (-18 C° 'de 24 saat, $+3\text{ C}^{\circ}$ 'de 24 saat ve -4 C° 'de 24 saat, 3 C° 'de 24 saat olacak şekilde 0, 1, 3, 6 farklı çevrim) uygulamış, zemin sınıfının, zeminin ince dane oranının, donma sırasındaki başlangıçtaki su muhtevasının, donma hızının, donma çözülme çevrim sayısının zemin daneleri üzerinde ciddi bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır.
- Chamberlain vd. (1990), yapmış olduğu çalışmada, kompakte edilen zeminin donma çözülme çevrimleri sonunda gösterdiği davranışın başlangıç su muhtevasına, doygunluk oranına, kompaksiyon parametrelerine bağlı olduğunu belirtmiştir.
- Lehrsche vd. (1991), ince dane oranı ve organik madde içeriği farklı olan 6 zemin üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmada, su muhtevasının ve donma çözülme çevrim sayısının etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, -14 C° 'de 24 saat, $+6\text{ C}^{\circ}$ 'de 24 saat beklettikleri deney numunelerini sırasıyla 0, 1, 3, 5 farklı donma çözülme çevrimine tabi tutmuşlardır. İnce dane oranı, organik madde içeriği ve başlangıç su muhtevasının, donma sonrasında zemin yapısını etkileyen önemli faktörler olduğunu ortaya koymuşlardır.
- Staricka ve Benoit (1995), donma çözülme çevrim sayısının artmasının zeminin yapısal dayanıklılığını azalttığını ve buna bağlı olarak zeminin erozyona daha yatkın hale geldiğini belirtmiştir.
- Oztas ve Fayetorbay (2003), donma işleminin danelerin stabilitesini bozucu bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.
- Kværnø ve Øygarden (2006), donma çözülmenin agrega stabilitesi üzerindeki etkilerini inceleyebilmek adına, -15 C° 'de 24 saat, $+9\text{ C}^{\circ}$ 'de 48 saat beklettikleri deney numunelerini sırasıyla 0, 1, 3, 6 farklı donma çözülme çevrimine tabi tutmuşlardır. Kværnø ve Øygarden (2006), yapmış oldukları bu çalışma ile zeminin fiziksel özelliklerinin (özellikle dane yapısının) donma ve çözülme çevrimlerinden ciddi bir şekilde etkilendiğini göstermişlerdir.
- Kværnø ve Øygarden (2006) ile Aksakal (2009)'ın yapmış oldukları çalışmalar Staricka ve Benoit (1995)'i desteklemektedir.

Zemin aşınabilirliğinin önemli bir göstergesi olan “zemin agrega stabilitesi” üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkileri literatürde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, donma çözülme çevrimlerinin dane yapısı üzerindeki etkilerinin; zeminin yapısına ve sınıfına, organik madde içeriğine, başlangıç dane boyutuna, donma anındaki ve başlangıçtaki su muhtevasına, donma ve çözülme çevrimlerinin sayısına ve donma sıcaklığına bağlı olduğu ortaya konulmuştur (Bronick ve Lal, 2005; Cruse vd., 2001; Gullu ve Khudir, 2014; Hazirbaba ve Gullu, 2010; Hohmann-Porebska, 2002; Lai vd., 2008; Li vd., 2011; Lipson ve Schmit, 2004; Mu vd., 2011; Mutlutuk vd., 2004; Oliveira vd., 2005; Oztas ve Fayetorbay, 2003; Proskin vd., 2010; Sahin vd., 1999; Six vd., 2004; Soğancı, 2004; Sönmez, 1994; Staricka ve Benoit, 1995; Xie vd., 2015; Yao vd., 2008).

Donma ve çözülme çevrimlerinin agrega stabilitesi üzerindeki etkilerine ilişkin çalışmaların tümü, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin dane stabilitesini azaltma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

1.1.2 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Mukavemetine Etkisi

Zemin sınıfı, dane yapısı, su içeriği, donma (dondurma) hızı, donma anındaki su muhtevası, donma çözülme çevrim sayısı ve donma çözülme sınır sıcaklık değerleri ile DÇ / mukavemet arasındaki ilişkiler araştırmacılar tarafından incelenmiş, donma çözülme çevrim sayısının artması ile mukavemetin azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları kronolojik bir sıra ile aşağıda özetlenmiştir.

- Donma çözülmenin kompakte edilen zeminlerin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri, Broms ve Yao (1964)'nin yüksek ve düşük donma çözülme hızlarına maruz kalan doymuş siltli kil üzerinde yaptıkları drenajsız üç eksenli kayma mukavemeti (UU) deneyleri ile araştırılmaya başlanmıştır. Yapmış oldukları çalışmada hazırlamış oldukları zemin üzerinde iki farklı donma çözülme hızı uygulamış, her iki donma çözülme hızında elde ettiği mukavemet değerlerini karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarda elde ettikleri bulgulara göre, çözülme sonrasında ortaya çıkan suyun bir kısmı zemin daneleri tarafından absorbe edilirken, kalan kısmı serbest su olarak kalmaktadır. Donma ve çözülme çevrimleri boyunca bu suyun neden olduğu boşluk suyu basıncının artması, efektif gerilmelerin azalmasına, danelerin genişlemesine ve buna bağlı

olarak mukavemetin azalmasına neden olmaktadır. Düşük donma hızı daha kalın buz merceklerinin gelişmesine izin verirken, daha yüksek olan donma hızı, kalın buz merceklerinin oluşmasına izin vermemektedir. Çözülme olayından sonra merceklerden gelen suyun hızlı bir biçimde absorbe edildiği, mukavemet azalmasının ise yalnızca danelerin genleşmesine bağlı olduğu belirlenmiştir.

- Culley (1971), -17,7 C°'de 8 saat, +21.1 C°'de 8 saat beklettikleri deney numunelerini 3 donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, tamamlanan çevrimlerin akabinde tekrarlı yüklemeler altında üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan bir zeminin tekrarlı yüklemeler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerini incelemiş ve donma çözülme çevrimlerinin zeminin davranışını etkilediğini ortaya koymuştur.
- Alkire ve Morisson (1982), donma çözülme çevrimlerine maruz bıraktıkları iki farklı zemin üzerinde tekrarlı yükleme deneyleri yapmış, soğuk bölgelerde tekrarlanan donma çözülmenin, sıkıştırılmış temel zemininin dayanım gibi geoteknik özelliklerini ciddi bir biçimde zayıflattığını ve bozduğunu, bu nedenle binalar, yollar, hava yolları, boru hattı ve kazık gibi çeşitli yapıların hasar görmesine neden olabileceğini belirtmişlerdir.
- Formanek vd. (1984), siltli zemin üzerinde yapmış oldukları çalışmada sadece 1 donma çözülme çevriminin bile zeminin mukavemetini ciddi bir biçimde azalttığını ortaya koymuşlardır.
- Graham ve Au (1985), donma çözülme çevrimlerinin düşük gerilmelerde daha düşük dayanımlara sebep olduğunu ve artan çevrim sayısının kil zeminde ciddi bir şekilde çatlak yapısı oluşturduğunu ortaya koymuşlardır.
- Aoyama vd. (1985) ve Yong vd. (1985)'in yapmış oldukları çalışmalar daha önce yapılan çalışmaları destekleyici nitelikte olmuştur.
- Van Klaveren (1987) yapmış olduğu deneysel çalışmasında, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin kritik kesme dayanımının, donma çözülme çevrimine maruz kalmayan zeminin dayanımından daha az olduğunu göstermiştir.
- Konrad (1989), Zimmie ve La Plante (1990), Ono ve Mitachi (1997), Viklander (1998), donma çözülme çevrimlerinin gevşek sıkılıktaki zeminlerin yoğunluğunu arttırırken, sıkı zeminlerin yoğunluğunu azalttığını

belirlemişlerdir. Ayrıca, sıkı yoğunluktaki zeminlerin donma çözülme çevrimleri altında şişmeye daha çok meyilli olduğunu ortaya koymuşlardır.

- Lee vd. (1995), donma çözülme çevrimlerinin resilient modülü üzerinde önemli miktarda azalma meydana getirdiğini yaptıkları çalışmalar ile belirlemişlerdir.
- Pousette vd. (1999), %200 nem içeriğine sahip çeşitli turba zemin üzerinde yaptıkları çalışmada, donma çözülme çevrimine maruz kalan zeminin, çevrime maruz kalmayan zemine kıyasla mukavemetini %30 oranında kaybettiğini belirlemişlerdir.
- Simonsen ve Isacsson (2001) ve Simonsen vd. (2002), donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin resilient modülünde önemli ölçüde azalma meydana geldiğini ortaya koyarak, Lee vd. (1995)'in çalışmasında elde ettiği bulguları desteklemiştir.
- Wang vd. (2007), Wang vd. (2009), Li vd. (2011) ve Işık (2014)'ün donma çözülme çevrimlerinin yoğunluk üzerindeki etkisinin incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmalar, Alkire ve Morrison (1982), Viklander (1998), Ono ve Mitachi (1997)'in çalışmalarını destekleyici nitelikte olmuştur.
- Aksakal (2009), Li vd. (2012), Ozgan vd. (2015), Zaimoğlu ve Akbulut (2019)'un yaptığı çalışmalar da, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin mukavemetini önemli ölçüde (~%74) azalttığını göstermektedir.
- Donma çözülme çevrimlerinin zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri uzun zamandır incelenen konular arasında yer almakta olup, devam eden çalışmalar da literatürü destekleyici nitelikte olmuştur (Allman ve Atkinson, 1992; Binal ve Adeli Ghare Viran, 2015; Binal ve Viran, 2018; Casey ve Germaine, 2013; Chen vd., 1994; Coop, 1991; Czurda ve Hohmann, 1997; Ghazavi ve Roustaei, 2010; Gutierrez vd., 2008; Hazırbaba ve Güllü, 2010; Jafari ve Shafiee, 2004; Leroueil vd., 1991; Moniz, 2009; Qi ve Ma, 2008; Quirós vd., 2000; Thevanayagam vd., 2002).

1.1.3 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Hidrolik İletkenliğine Etkisi

Zemin sınıfı, dane yapısı, su içeriği, donma (dondurma) hızı, donma anındaki su muhtevası, donma çözülme çevrim sayısı ve donma çözülme sınır sıcaklık değerleri ile DÇ / hidrolik iletkenlik arasındaki ilişkiler araştırmacılar tarafından incelenmiş, donma çözülme çevrim sayısının artması ile hidrolik iletkenliğin de arttığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar kronolojik bir sıra ile aşağıda özetlenmiştir.

- Mitchell vd. (1965), zemin dane yapısı, kompaksiyon enerjisi ve su muhtevasının hidrolik iletkenliği kontrol eden en kritik parametreler olduğunu belirtmiştir.
- Benoit ve Bornstein (1970) ile Smith (1972), ince daneli zeminlerin hidrolik iletkenliklerinin, donma çözülme çevrimlerinden daha fazla etkilendiğini ve kaba daneli zeminlere göre hidrolik iletkenliklerinde daha fazla artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.
- Benoit (1973), dane boyutu (0.0-0.8 mm, 0.8-1.2 mm, and 1.2-2.0 mm) farklı 3 zemin üzerinde donma çözülme çevrimleri uygulayarak, donma çözülmenin hidrolik iletkenlik üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla, -18 C°'de ve -4 C°'de beklettikleri zemin numunelerine 20 donma çözülme çevrimi uygulamıştır. Benoit, yapmış olduğu bu çalışma ile donma çözülmenin zemin daneleri üzerinde parçalanmaya sebebiyet verdiğini, zemin ve danelerin yapısının donma çözülmeden ciddi bir şekilde etkilenecek hidrolik iletkenliğin arttığını ortaya koymuştur.
- Chamberlain ve Blouin (1977), ince daneli zeminler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde, donma ve çözülme çevrimlerinin zemin danelerini parçaladığı, çatlak-boşluk oluşturduğu ve bunun sonucunda hidrolik iletkenliğin arttığını belirtmişlerdir.
- Chamberlain ve Gow (1979), donma çözülmenin ince daneli zeminlerin hidrolik iletkenliğinin artmasına neden olduğunu, ancak iri daneli zeminlerin hidrolik iletkenliğini değiştirmediklerini yaptıkları deneysel çalışmalarında belirlemişlerdir. Bu çalışmasında elde ettiği veriler Benoit ve Bornstein (1970) ile Smith (1972)'yi desteklemektedir. Ayrıca, Chamberlain ve Gow (1979), donma çözülme çevrimi uyguladığı 4 farklı plastisiteye sahip zemin üzerinde yaptığı deneyler sonunda, donma çözülme çevrimlerinin yüksek plastisite gösteren zeminin hidrolik iletkenliğini daha çok arttırdığı sonucuna varmışlardır.
- Chamberlain vd. (1990), sıkıştırılmış ince daneli zeminin hidrolik iletkenliğinin donma çözülme çevrimlerinden sonra arttığını, bu artış mekanizmasının da donma ve çözülme sırasında mikro çatlakların genişlemesine bağlı olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, donma ve çözülmenin hidrolik iletkenlikte yaklaşık 10-100 kat artışa sebep olduğunu, sadece 1 DÇ çevriminin bile büyük değişimler

meydana getirdiğini, kompakte edilen zemin için donma ve çözülme çevrimlerinin etkisinin her zaman sabit olmadığını, bu etkilerin su muhtevası, doygunluk derecesi ve kompaksiyon koşuluna da bağlı olduğunu belirtmiştir.

- Zimmie ve La Plante (1990), donma çözülme çevrimlerinin sıkıştırılmış kilin hidrolik iletkenlik değerinde 10-100 kat artışa neden olduğunu belirlemiştir. Yapmış olduğu çalışmalarda elde ettiği bulgular, Chamberlain vd. (1990)'u destekleyici nitelikte olmuştur.
- Kim ve Daniel (1992), donma çözülme çevrimlerine maruz kalan ve optimum su muhtevası değerinin ıslak tarafında sıkıştırılan zeminlerin hidrolik iletkenliklerindeki artışın, optimum su muhtevası değerinin kuru tarafında sıkıştırılan zeminlere göre daha duyarlı olduğunu (~100 kat) ortaya koymuş, boşluk oranındaki azalma ile hidrolik iletkenliğin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Kim ve Daniel (1992), modifiye kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan zeminlerin, standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan zeminlere göre donma çözülmeye daha dayanıklı olmadığını ifade etmiştir.
- Othman ve Benson (1993), üç farklı kil zemin üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, sıkıştırma koşulları (sıkıştırma su muhtevası ve sıkıştırma enerjisi) ile çevre koşullarının (sıcaklık gradyanı, nihai sıcaklık, donmanın boyutsallığı, donma çözülme çevrimlerinin sayısı ve gerilme durumu) hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar donma çözülme çevrim sayısının, donma (dondurma) hızının ve uygulanan gerilmelerin hidrolik iletkenliği etkileyen en önemli faktörler olduğunu göstermiştir.
- Benson vd. (1995), killerin hidrolik iletkenliklerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerinin kompakte edilen kilin fiziksel özelliklerine, mikro yapısına, plastisite indeksine, şişme potansiyeline ve kompaksiyon koşullarına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar, Konrad (1989)'un çalışmalarını desteklemiştir.
- Donma çözülmenin zeminin hidrolik iletkenlik davranışı üzerindeki etkileri, zeminin mikro yapısına, plastisite ve şişme özelliklerine, kompakte edildiği su muhtevasına, kompaksiyon enerjisine, başlangıç koşullarına, donma çözülme çevrimlerinin sayısına ve donma sıcaklığına bağlı olduğu uzun süredir yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur (Cervi, 2005; Daniel, 1989; Sterpi, 2015; Wong ve Haug, 1991).

1.1.4 Donma Çözülme Çevrimlerinin Zemin Sıkışabilirliğine Etkisi

Zemin sınıfı, dane yapısı, su içeriği, donma (dondurma) hızı, donma anındaki su muhtevası, donma çözülme çevrim sayısı ve donma çözülme sınır sıcaklık değerleri ile D_C / sıkışabilirlik arasındaki ilişkiler araştırmacılar tarafından incelenmiş, donma çözülme çevrim sayısının artması ile sıkışabilirliğin de arttığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar kronolojik bir sıra aşağıda özetlenmiştir.

- Morgenstern ve Nixon (1971), donma çözülme çevrimlerinin zeminler üzerindeki olumsuz etkilerini araştırmış, özellikle donmuş zeminlerin çözülmesi sırasında boşluk suyu basıncının arttığını ve zeminin oturma davranışında önemli etkiye sahip olduğunu vurgulamıştır.
- Chamberlain ve Blouin (1978), donma çözülme çevrimlerinden sonra konsolidasyon katsayısının (c_v) arttığını, böylece konsolidasyonun daha hızlı gerçekleştiğini gözlemlemiştir.
- Graham ve Au (1985), donma çözülmenin doğal kilin sıkışabilirliğinde ve boşluk suyu basıncında artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarında Morgenstern ve Nixon (1971)'i destekleyici bulgular elde etmişlerdir.
- Zou ve Boley (2009), literatür verilerini kullanarak, zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması ile meydana gelebilecek don kabarmasını, çözülme oturmasını ve buna bağlı olarak zeminin oturma davranışını tahmin etmeye yönelik teorik bir model geliştirmişlerdir.
- Paudel ve Wang (2010), ince daneli zeminler üzerinde 0, 3, 5, 10 donma çözülme çevrimi uygulayıp, sonrasında konsolidasyon deneyleri gerçekleştirerek zeminin sıkışabilirlik davranışını incelemişlerdir. Donma çözülme çevrim sayısının artması ile konsolidasyon katsayısının (c_v) büyük bir oranda arttığını gözlemlemişlerdir.
- Ozgan vd. (2015), donma çözülme çevrimlerinin zeminin sıkışabilirlik davranışına etkilerini incelemiş, artan donma çözülme çevrim sayısının zeminin oturmasını önemli ölçüde arttırdığını belirlemişlerdir.

Donma çözülmenin zeminin sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkileri, zeminin mikroyapısına, plastisite ve şişme özelliklerine, kompakte edildiği su muhtevasına, kompaksiyon enerjisine, başlangıç koşullarına, donma çözülme çevrim sayısına ve

donma sıcaklığına bağlı olduğu uzun süredir yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur.

1.1.5 Donma Çözülme Çevrimlerinin Olumsuz Etkileri İçin Yapılan İyileştirme Çalışmaları

Donma çözülme çevrimlerinin zemin üzerinde meydana getirdiği olumsuz değişimlerin büyüklüğü ve derecesi iklim şartlarına, zemin türüne (dane dağılımı, mineralojik yapı vb.) ve özelliklerine, ortamdaki su miktarına, sürşarj yükü ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır (Işık, 2014). Göz önüne alınan tüm bu etkiler sonrası oluşabilecek fiziksel ve mekanik değişimlerin zemin mühendisliği ve yol mühendisliği açısından önemi de oldukça büyüktür. Bu nedenle, özellikle soğuk iklim bölgelerinde yapılacak olan mühendislik tasarımlarında, iklim etkisi de göz önünde bulundurulmalı, donma çözülmenin zemin üzerindeki etkileri dikkate alınarak tasarımlar yapılmalıdır (Alizadeh, 2018; Alkan, 2009; Özlü, 2022; Tan vd., 2012).

Donma çözülme çevrimlerinin zemin üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkiler literatürde detaylı bir biçimde incelenmiştir. Zeminlerin donma çözülme çevrimleri sonunda kaybolan taşıma kapasitelerini arttırmak, meydana gelen deformasyon, hidrolik iletkenlik ve oturma miktarlarını azaltmak amacıyla yapılan iyileştirme çalışmaları da aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Donma çözülme çevrimlerinin olumsuz etkilerine karşı yapılan iyileştirme çalışmalarında, kireç, en fazla tercih edilen katkı malzemesidir (Aldaoood vd., 2014; Aldaoood vd., 2016; Alizadeh, 2018; Çiftliklioğlu, 2018; Hotineanu vd., 2015; Jafari ve Esna-ashari, 2012; Walker ve Karabulut, 1965; Yıldız ve Soğancı, 2012; Yılmaz ve Fidan, 2017; Yılmaz ve Demir, 2019).
- Kireçten sonra en çok tercih edilen bir diğer katkı malzemesi de uçucu küldür (Bin-Shafique vd., 2011; Erol, 2007; Yılmaz, 2018; Yılmaz ve Demir, 2019).
- Uçucu kül ve kireç gibi klasik inşaat katkı malzemesi olan çimento da tercih edilen katkı malzemeleri arasındadır (Tan vd., 2012; Zorluer ve Usta, 2003).
- Kireç, uçucu kül, çimento gibi klasik toz katkı malzemelerinin yanı sıra, donma çözülme çevrimlerinin olumsuz etkilerine karşı polimerler ile de iyileştirme çalışmaları yapılmıştır (Çalık vd., 2019; Sarıgöl, 2021).

- Fiber, taban külü, jüt fiber ve çelik fiber gibi malzemeler kullanılarak da iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Boz ve Sezer, 2018; Ghazavi ve Roustaei, 2010; Gullu ve Khudir, 2014; Khudir, 2014).
- Mermer tozu, pomza tozu, kireç tozu da iyileştirme malzemesi olarak tercih edilen katkı malzemeleri arasındadır (Aydın, 2018; Keskin vd., 2014; Yorulmaz, 2018; Yılmaz, 2018).
- Tercih edilen klasik inşaat malzemelerinin yanı sıra son yıllarda keçi kılı lifi, atık lastik parçaları ve bacillus sp. gibi farklı materyaller de kullanılmaya başlanmıştır (Bağrıaçık vd., 2021; Yarbaşı, 2020).
- Ancak, donma çözülme çevrimlerinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya yönelik yapılan tüm iyileştirme çalışmaları değerlendirildiğinde, kullanılan katkı malzemelerinin donma çözülme çevrimlerinin ardından zeminin dayanımını azalttığı gözlemlenmiştir (Çiftliklioğlu, 2018; Dayioğlu vd., 2017; Eskişar vd., 2015; Horiguchi, 1987; Keskin vd., 2017; Li vd., 2012; Oman ve Lund, 2018; Mahedi vd., 2019). Tüm bu bulgular, zeminin donma çözülme çevrimlerinden sonraki performansını iyileştirmek için daha etkili bir yöntemin belirlenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

Isı enerjisinin farklı bir zamanda kullanılabilmesi amacıyla geçici süre ile depo edilmesi işlemine ısı enerjisi depolama işlemi denilmektedir (Mondal, 2008). Gizli ısı, duyulabilir ısı ve kimyasal reaksiyon ısısı depolama başlığı altında farklı ısı enerjisi depolama teknikleri vardır. Bunlardan biri de “**gizli ısı depolama**”dır ve en etkili yöntemlerden biri olup “faz değiştirme ısısı depolama” olarak da isimlendirilmektedir. Gizli ısı depolama özelliği olan bu malzemeler faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak isimlendirilmektedirler (Mondal, 2008; Tao, 2008). Faz değiştiren malzemeler, gizli ısı enerjisini depolamanın en etkili yollarından biri olarak kabul edilmektedir Kosny, 2015.

Faz değiştiren malzemeler (FDM-PCM-Phase Change Material) veya diğer adı ile gizli termal-ısı depolama malzemeleri, termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayan malzemelerdir (Dal, 2020). Faz değiştiren malzemeler, faz değiştirme aralığı olarak isimlendirilen belirli bir sıcaklık aralığında, bir fazdan diğer bir faza geçiş yapmaktadırlar (Mattila, 2006). Malzemenin iç enerjisinde meydana gelen

değişimler, bu malzemenin faz değiştirmesine (katı-sıvı-buhar) sebebiyet vermektedir. Bu sayede, faz değiştiren malzemeler, çalışma sıcaklık sınırı koşullarında faz değiştirebilmekte ve bu faz değişimi olayı esnasında da gizli ısıyı depolayabilmektedirler. Bu malzemeler, büyük miktarda enerjiyi neredeyse hiç kayıp olmadan sıcak veya soğuk olarak depolamak ve daha sonra tekrar serbest bırakmak için fiziksel bir etki kullanmaktadırlar. Faz değişimi sırasında depolanan veya ortama yayılan ısı da gizli ısı olarak tanımlanmaktadır (Boan, 2005; Tao, 2008).

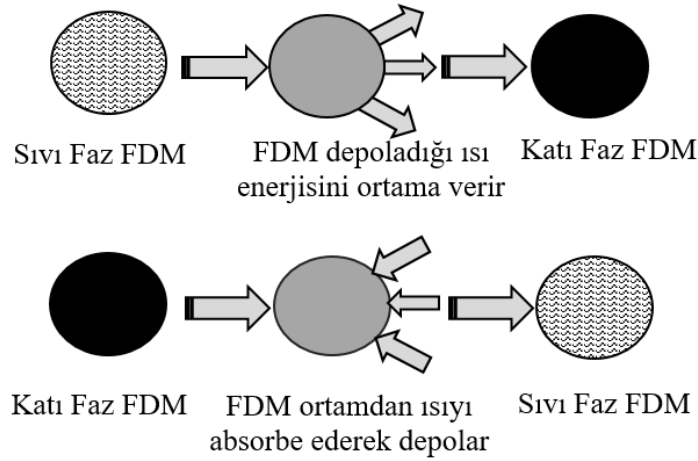
Katı, sıvı, buhar olmak üzere mevcut olan 3 faz dikkate alındığında, faz değiştiren malzemeler için faz değişimleri, katıdan katıya ve katıdan sıvıya olacak şekildedir. Sıvıdan buhara faz değişimi, gaz fazın depolanmasında karşılaşılan sorunlar nedeniyle ısı depolamaya uygun değildir. Bu amaçla, çalışma şartlarına uygun olacak şekilde, yüksek ısıyı depolamak amacıyla, ilgili çalışma sıcaklıklarında faz değiştiren malzemelerden yararlanılmaktadır (Dal, 2020).

Faz değiştiren malzemelerin çalışma prensibi (1.1) eşitliği ile açıklanmaktadır.

$$A + (ısı) \rightarrow B + C \quad (1.1)$$

Eşitlikte yer alan tepkimeyi başlatmak ve A'yı B ve C'ye dönüştürebilmek için ısı emilmektedir. Sistem içerisindeki ortam sıcaklığının artması ile (ortam sıcaklığı, FDM'nin erime sıcaklığına kadar yükseldiğinde) katı fazda bulunan FDM'nin bağları kopmakta, FDM erimeye başlamakta ve FDM katı fazdan sıvı faza geçmektedir. Bu erime işlemi tamamlanana kadar sıcaklık sabit kalmaktadır. Bu da, ortamdaki ısıyı soğurmaktadır. FDM, sıvı faza dönüşene kadar geçen süre içerisinde ısıyı absorbe etmeye devam etmektedir.

B ve C, A'yı oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde, ortam sıcaklığı faz değiştiren malzemenin katılaşma sıcaklığına kadar düştüğünde ise FDM katılaşmaya başlamakta ve katılaşma prosesi boyunca yapısındaki daha önceki adımlarda absorblanan ve depolanan tüm ısıyı ortama geri vermektedir. Tüm bu süreç sonunda da FDM katılaşmaktadır. Böylece faz değişimi gerçekleşmektedir (Kanimozhi vd., 2017; Mattila, 2006; Muñoz, 2016; Socacı, 2012; Waqas vd., 2018). Faz değişim prosesi sırasında, faz değiştiren madde tamamen eriyene veya katılaşana kadar sıcaklığı sabit kalmaktadır (Mattila, 2006). (1.1.) eşitliğinde açıklanan durum Şekil 1.1'de görselleştirilmiştir.



Şekil 1.1 FDM çalışma prensibi (Waqas vd. (2018))

Şekil 1.1’de sunulan görsel göz önünde bulundurulduğunda FDM’lerin çalışma mekanizması daha yalın bir şekilde aşağıdaki gibi açıklanabilir.

1. FDM’nin iç enerjisinde meydana gelen değişimler sonucu FDM faz değiştirmektedir.
2. Uygun sıcaklık aralıklarında FDM’nin faz değiştirmesi ile ortaya çıkan gizli ısı depolanmaktadır.
3. FDM’ler depoladıkları enerjiyi, katı faza geçişleri sırasında bulundukları ortama serbest bırakmaktadır. Sıvı faza geçişleri sırasında ise ortamdan serbest bıraktığı miktar kadar enerjiyi geri almaktadır.
4. Böylece, FDM’ler sıcaklık değişimleri sırasında sıcaklık dalgalanmasını azaltmaktadırlar (Dal, 2020).

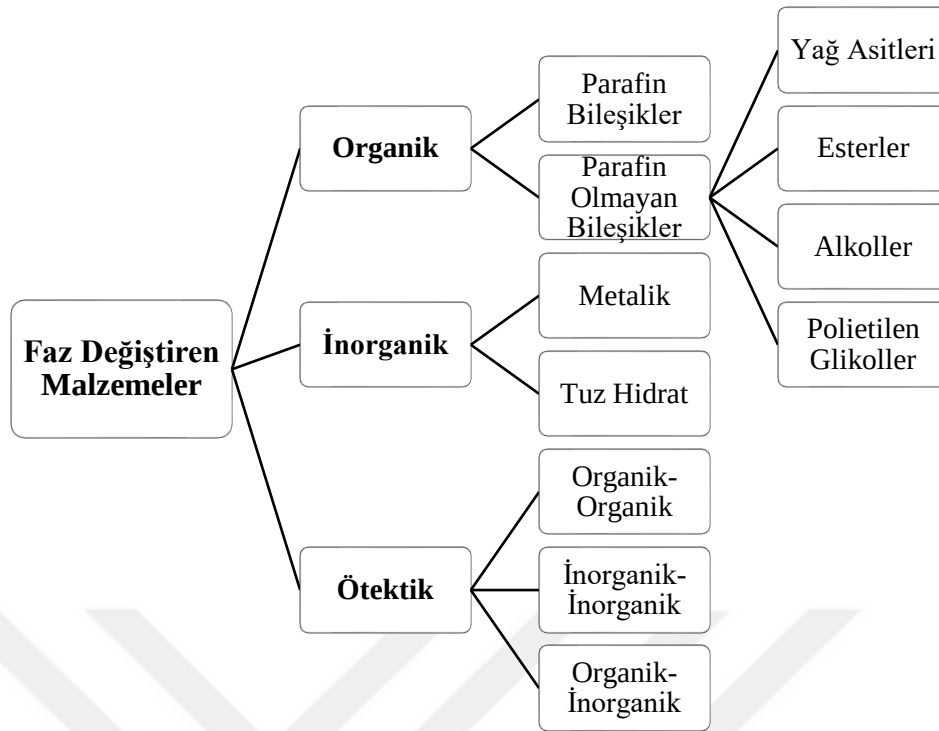
FDM’lerin çalışma mekanizması göz önünde bulundurulduğunda, sistemde kullanılacak olan FDM’nin seçiminde, termal, kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel faktörler etkin rol oynamaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 FDM seçim kriterleri (Anusha, 2016; Khot ve Khanwalkar, 2016; Scores, 2015; Socaciu, 2012; Utlu vd., 2013)

<i>Özellik</i>	<i>Kriter</i>
<i>Termal Özellikler</i>	Çalışma sıcaklıkları arasında faz değiştirebilmeli. Depolama biriminin hacmine göre yüksek geçiş entalpisine sahip olmalı. Birim kütle başına yüksek gizli faz değişim ısısına sahip olmalı. Faz değişimi boyunca, faz ayrışmasını önlemeli. Faz değişimi sırasında düşük hacim değişimi olmalı.
<i>Kinetik Özellikler</i>	Katılaşma süreci boyunca sıvı fazdan katı faza hızlı bir sürede geçmeli. Yüksek kristalleşme hızına sahip olmalı.
<i>Kimyasal Özellikler</i>	Kimyasal yapısı ayrışmamalı. Uzun süre faz değişim çalışmalarında kullanılabilirliği. Ortamda aşındırıcılık meydana getirmemeli. Kararlı bir kimyasal yapıya sahip olmalı. Yanıcı, zehirli ve patlayıcı olmamalı.
<i>Ekonomik Özellikler</i>	Uygun maliyetli olmalı. Kolay temin edilebilmeli.
<i>Çevresel Özellikler</i>	Geri dönüşümü olmalı. Çevreye kirlenici etkisi olmamalı.

Tablo 1.1’de önerilen seçim kriterlerine ilave olarak FDM seçimi için göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametre FDM’nin yüksek ısı depolama özelliğine sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra, termal enerji depolama (TED) sistemlerinin çalışma sıcaklığı aralıklarında FDM’nin faz değiştirebilmesi için, katı sıvı faz özellikleri, yüksek faz değişim ısısı ve yüksek termal iletkenlik gibi özellikler de göz önünde tutulmaktadır. FDM’lerin TED sistemleri içerisindeki servis ömürleri ve çevreye olan olumlu/olumsuz etkileri de çok önemlidir (Soares, 2015; Socaciu, 2012; Utlu vd.,2013).

Faz değiştiren malzemeler çok geniş bir aralıkta farklı özelliklere sahip olmakla birlikte başlıca üç ana gruba ayrılmaktadır. FDM’lerin sınıflandırması Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2 FDM'lerin sınıflandırılması (Sharma vd. (2007))

Organik faz değiştiren malzemeler (OFDM), kristalleşebilen ve korozif olmayan malzemelerdir. Parafin olan ve olmayan bileşikler olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Parafin bileşikler, parafin mumlarını, parafin olmayan bileşikler ise yağ asitleri, esterler, alkoller ve polietilen glikoller (PEG)'i içermektedir. İnorganik FDM'ler; tuzlar, tuz hidratlar ile metalik bileşiklerdir. Bunlar, su ile doğal tuzlardan yapılan, tasarlanan ve hidratlanan tuz çözeltileridir. Ötektik FDM'ler ise organik-organik, organik-inorganik veya inorganik-inorganik olacak şekilde en az iki FDM'nin karışımından elde edilen ikili karışımlardır (Sharma vd., 2007). FDM'lerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcut olup Tablo 1.2'de sunulmuştur.

Tablo 1.2 Organik, inorganik ve ötektik FDM’lerin avantaj ve dezavantajları
(Waqas vd. (2018))

<i>FDM</i>	<i>Avantaj</i>	<i>Dezavantaj</i>
Organik	✓ Korozyon ve fazla soğutma problemi yok. ✓ Kimyasal yapısında kararlılık. ✓ Farklı FDM kapları ile yüksek uyumluluk.	✓ Yüksek yanıcılık. ✓ Düşük ısı iletkenlik. ✓ Hacimde büyük değişiklikler.
İnorganik	✓ Yüksek ısı iletkenliği. ✓ Yüksek gizli ısı. ✓ Düşük hacim değişiklikleri. ✓ Yanıcılık yok. ✓ Düşük maliyet.	✗ Oldukça aşındırıcı. ✗ İstenilen sonuçları etkileyebilecek aşırı soğutma. ✗ Mikro ve nanokapsülleme teknikleriyle uyumsuzluk.
Ötektik	✓ Keskin faz değişim sıcaklığı. ✓ Yüksek ısı iletkenlik. ✓ Yüksek termal depolama. ✓ Erime ve katılaştırma işlemi sırasında faz ayrımı sorunlarında sınırlılık.	✗ Oldukça maliyetli. ✗ Sınırlı kullanılabilirlik. ✗ Termofiziksel özellikler hakkında çok sınırlı veri.

FDM’lerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları Tablo 1.2’de sunulmuştur. Tablo 1.2’de verildiği üzere, organik FDM’ler maliyet olarak da oldukça uygundur ve özellikle parafin bileşikler güvenli bir yapıya sahip olduklarından dolayı sistem içerisinde kullanımları sırasında yaşanabilecek aksaklıklar tahmin edilebilmektedir. İnorganik FDM sınıfı aşırı soğutulduklarında uygulamalarda problemler meydana gelmektedir. Katı-sıvı faz geçişi sırasında malzemenin bir kısmının sıvı faza geçiş yapamayarak katı fazda kalması verilen enerjinin sistem içerisinde eşit olarak yayılamamasına neden olmaktadır. Bu dezavantajlarına ilave olarak, zayıf bir stabiliteye sahiptirler ve doğada aşındırıcı olarak bulunmaktadırlar. Ötektik FDM’lerin ise depolama yoğunlukları organik bileşiklerle kıyaslandığında biraz daha yüksektir. Bunun yanı sıra, ötektik FDM’lerin termofiziksel özellikleri ile ilgili sınırlı veri bulunmaktadır (Anusha, 2016; Sharma vd., 2007).

Organik FDM (OFDM)’leri düşük yoğunluklu olmalarından kaynaklanan büyük hacim değişikliğinden dolayı fazla depolama hacmi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca OFDM’lerin yanıcı olması ve düşük ısı iletkenliğe sahip

olmaları da dezavantajlarıdır. Fakat tüm bu dezavantajlara rağmen, OFDM'lerin düzenli ergime, aşırı soğumaya uğramadan donabilme ve kendiliğinden kristalleşebilme özellikleri vardır. Organik FDM'lerin en önemli ve ayırt edici özellikleri, faz değişimi süresince FDM üretiminde kullanılan malzemelerin uyum içerisinde faz değiştirmesidir. Organik FDM'ler, faz ayırımına uğramadan sıvı faza ve tekrar faz ayırımına uğramadan katı faza geçebilmektedir. Bu özellik, OFDM'lerin çalışma prensibi bakımından son derece önemlidir ve bu durumun devamlılığı da, OFDM'leri diğer FDM'lerden daha önemli bir konuma getirmektedir. Bu sebeple organik FDM'ler faz değişim davranışı ile FDM'ler içerisinde önemli bir konuma sahiptir (Bugaje, 1997; Feldman vd., 1986; Sharma vd., 2007; Xiao vd., 2002).

Organik FDM'lerin de kendi içinde avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Tablo 1.3'te OFDM'ler grubunda yer alan parafin olan ve parafin olmayan bileşiklerin avantaj ve dezavantajları sunulmuştur (Crespoa vd., 2018).

Tablo 1.3 Parafin olan ve parafin olmayan OFDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Bugaje, 1997; Crespoa vd., 2018; Gök vd., 2008; Sarı, 2003; Xiao vd., 2002; Velraj vd., 1998)

OFDM	Avantaj	Dezavantaj
Parafin Bileşikler	✓ Termal ve kimyasal kararlılık. ✓ Zehirsiz ve korozif değil. ✓ Kolay temin ve uygun maliyet ✓ Kullanım sırasında öngörülebilir sonuçlar, emniyetli çalışma. ✓ Düşük buhar basıncı. ✓ Faz değişimleri hızlı ve faz ayırımı yok. ✓ Küçük hacim değişimi ve düşük yoğunluk.	✗ Düşük ısı iletkenliği. ✗ Orta derece yanıcılık.
Parafin Olmayan Bileşikler	✓ Termal ve kimyasal kararlılık. ✓ Zehirsiz ve korozif değil. ✓ Kolay temin. ✓ Dar çalışma sıcaklık aralığı.	✗ Oldukça yanıcı ve toksik. ✗ Düşük erime ısısı, yanma noktası, ısı iletkenliği ✗ Yüksek sıcaklıklarda dengesizlik.

Organik FDM grubu içerisinde yer alan parafin olmayan faz değiştiren maddelerin aşındırıcı ve yanıcı özelliği vardır. Bu sebeple, bunlar yüksek sıcaklıklara, alevlere

ve oksitleyicilere maruz bırakılmamalıdır. Parafin bileşikler ise daha geniş çalışma sıcaklığı aralıklarında çalışabilmektedirler. Sonuç olarak, Tablo 1.3'te verilen tüm bu özellikler parafinlerin ısı depolama sistemlerinde yaygın olarak tercih edilme nedenleridir (Sharma vd., 2007).

1.2.1 FDM Uygulama Teknikleri

FDM'ler, çalışmanın yapılacağı geleneksel yapı malzemesine doğrudan birleştirme, daldırma ve kapsülleme olacak şekilde üç farklı yöntem ile entegre edilmektedir. Bu üç yöntemin uygulama biçimi şu şekildedir:

- Doğrudan birleştirme yönteminde, sıvı veya toz FDM, alçı, beton, sıva vb. inşaat malzemelerine doğrudan karıştırılmaktadır.
- Daldırma yönteminde; alçı levha, tuğla, beton blok gibi gözenekli yapı malzemeleri, erimiş FDM' nin içine daldırılmaktadır.
- Kapsülleme yönteminde; FDM bir kabuk malzeme ile kaplanmaktadır (Soares vd., 2013; Schossig vd., 2005).

Bahsi geçen uygulama tekniklerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 1.4'te sunulmuştur.

Tablo 1.4 FDM uygulama tekniklerinin avantaj ve dezavantajları (Cui vd., 2015; Farid vd., 2004; Kosny, 2015)

		Avantaj	Dezavantaj
Doğrudan	✓	Basit.	✗ Sızıntı.
	✓	Ekonomik.	✗ Uyumsuzluk.
Birleştirme	✓	Ekipman ihtiyacı yok.	
Daldırma	-		✗ Sızıntı. ✗ Uyumsuzluk.
Kapsülleme	Mikro	✓ Sızıntı yok.	-
		✓ Isı transfer yüzey alanı fazla.	
		✓ Hacimsel değişim kontrolü.	
		✓ Kullanım kolaylığı.	
		➤ Yapısal dayanıklılık.	
	Makro	✓ Sızıntı yok.	✗ Zayıf termal iletkenlik. ✗ Kenarlarda katılma eğilimi.
		✓ Isı transfer yüzey alanı fazla.	
		✓ Hacimsel değişim kontrolü.	
		✓ Kullanım kolaylığı.	
		✓ Yapısal dayanıklılık.	

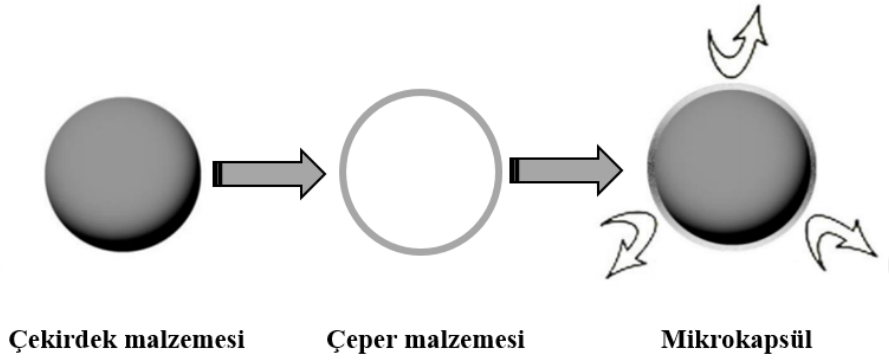
Tablo 1.4'te verilen bilgiler doğrultusunda, FDM uygulama teknikleri içerisinde en avantajlı olarak görülen kapsülleme tekniği; küçük FDM partiküllerinin herhangi

bir kaplama malzemesi ile çevrenmesidir (Anusha vd., 2016; Ostrý vd., 2015; Sevault vd., 2017; Socaciu, 2012). Tablo 1.4’te mikrokapsül ve makrokapsül olarak iki alt gruba ayrılan kapsülleme tekniğinde, uygulanan mikrokapsül ve makrokapsüllerin boyut sınırları Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3 Kapsül sınır boyutları (Özonur (2004))

Mikrokapsüllerin boyutları 1-1000 µm arasında olup, 1000 µm’den büyük kapsüllere makrokapsül, 1 µm’den küçük kapsüllere ise nanokapsül ismi verilmektedir. Şekil 1.4’te mikrokapsülleme işleminin görseli sunulmuştur.



Şekil 1.4 Mikrokapsülleme işlemi (Kut (2023))

Şekil 1.4’te görseli sunulan mikrokapsülleme işleminde; FDM, mikrokapsülün çekirdek malzemesini, polimerik çeper malzemesi ise mikrokapsülün kabuk kısmını oluşturmaktadır. Şekil 1.4’te düzenli formda görülen mikrokapsüller, tane boyutu, tane yapısı, çekirdek malzemesi, duvar malzemesi, duvar kalınlığı, katkı malzemeleri, geçirgenlik gibi özelliklerine göre farklı yapılara sahip olabilmektedir (Özonur, 2004).

Mikrokapsüller, FDM’nin hacim değişikliklerine izin vermektedir. Bunun yanı sıra, FDM’nin dış çevreyle etkileşimini azaltmaktadır. Ayrıca, mikrokapsüller; kuvvet, esneklik, korozyona dayanıklılık ve ısısal gereksinimlerinin karşılanmasını, FDM’nin çevre ile zararlı etkileşimlerinden korunmasını, ısı aktarımı için yeterli yüzeyin sağlanması görevlerini üstlenmektedir. Ayrıca, FDM’nin sıvı fazının kaybını (sızıntı) engellemek ve FDM’yi çevresinden izole etmek için, FDM’leri

uygulamalardan önce kapsüle almak zorunluluğu olan durumlar olabilmektedir. Bu avantajlar, FDM'nin yapı malzemesine ilave edilmesi tekniklerinden mikrokapsülleme tekniğini avantajlı kılmaktadır (Anusha vd., 2016; Ostrý vd., 2015; Sevault vd., 2017; Socaciu, 2012).

1.2.2 FDM Kullanım Alanları

Büyük miktarda gizli ısı abdorbe etmeleri ve yaymaları sebebi ile, FDM'ler ısı depolama kaynağı olarak çok geniş alanlarda kullanılmaktadır.

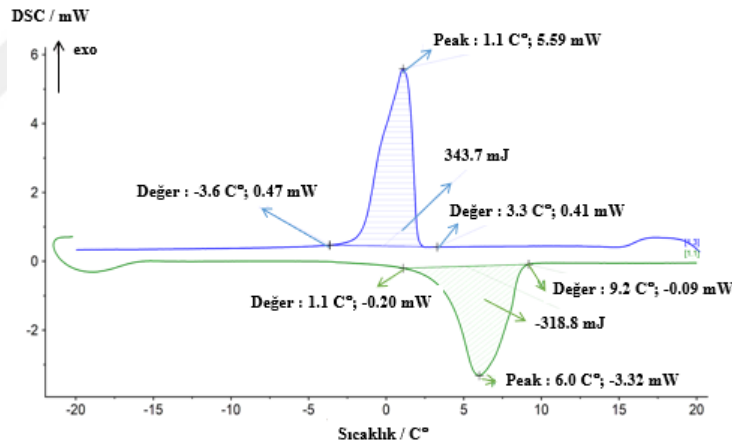
- Binaların ısıtılması ve soğutulması amacıyla izolasyonda (ısı depolama, yaşam ortamlarında sıcaklığın sabit tutulması),
- Enerji depolama sistemlerinde (klima-havalandırma),
- Elektronik cihazların ısınmasını önlemek amacıyla soğutma aksamalarında,
- Tekstil endüstrisinde (mikro kapsüllenmiş FDM'ler içeren akıllı tekstil ürünlerinde, soğuk ve sıcak iklim kıyafetleri),
- Gıda ambalajlarında (gıda, şarap, süt ürünlerinin soğuk tutulması),
- Medikal alanda (kan, doku ve organ taşınmasında ve soğuk kompres uygulamalarında),
- Otomotiv sektöründe (motorların soğutulması, termal konfor),
- Elektronik sektöründe (termal koruma),
- Uzay araçlarında (termal uygulamalar),
- İnşaatta (beton karışımlar, duvar panoları, çimento içerisinde, alçıda, sıvada, sandviç panellerde, aydınlatma sistemlerinde) (Konuklu, 2008; Zalba vd., 2003).

1.2.3 FDM Termal Özelliklerinin Belirlenmesi

FDM'nin termal özelliklerini belirleyebilmek adına birçok standart araç ve yöntem mevcuttur. Bunlardan en yaygın olarak tercih edilen Differential Scanning Calorimeters (Diferansiyel taramalı kalorimetre-DSC) analizi, bir malzemenin ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimini inceleyen termal analiz yöntemidir. DSC analizi, numunenin koruyucu bir atmosferik ortamda (N₂ gibi) belirli bir hızda ısıtılması, soğutulması ve belirli sıcaklıklarda bekletilmesi sonucu oluşan enerji farklılıklarındaki değişimleri ölçerek analiz etmektedir. DSC analizi, FDM'nin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime ve donma sıcaklıkları, erime ve kaynama noktası, kristalleşme zamanı ve sıcaklığı, özgül ısı kapasitesi, gizli faz değişim entalpisi, faz

değişim sıcaklığı, kürleşme derecesi ve oranı, raksiyon kinetiği, saflık, oksidatif ve termal kararlılık vb. malzeme özellikleri hakkında bilgi veren termal analiz yöntemidir (Erdemir ve Hekimoğlu, 2022; Wang vd., 2019).

DSC analizi için başlangıç sıcaklığı, işlem yapılacak ortamın sınır sıcaklık değerleri dikkate alınarak belirlenmektedir. DSC analizlerinde ısıtma hızı ve numuneyi belli bir sıcaklıkta tutma süresi, değişken parametrelerdir. Isıtma hızı, sıcaklık bölgelerine göre farklılık gösterirken, tarama hızı ise hassasiyet, sıcaklık ayarı, kararlılık, analiz zamanı, hal değişimi faktörlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Tarama hızı çoğu cihazda 20-1200 C° arasında olup, genel olarak 10 C°/dk'dır. Ancak bu değer, yöntemin sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. FDM'ler için daha gerçekçi ve uniform sonuçlar vereceğinden genellikle ~1 C°/dk olan düşük ısıtma ve soğutma hızlarının uygulanması önerilmektedir (Erdemir ve Hekimoğlu, 2022; Wang vd., 2019). Örnek temsil etmesi açısından bu tez çalışması kapsamında kullanılan FDM'nin DSC analizi sonucu Şekil 1.5'te sunulmuştur.



Şekil 1.5 DSC analiz sonucu

Şekil 1.5'te yer alan yeşil çizgi ısıtma sürecini, mavi çizgi ise soğutma sürecini temsil etmektedir. Analiz, -20 C°'de 2 dk. bekletildikten sonra başlatılmış ve ortam +20 C°'ye kadar +2 C°/dk tarama hızında adım adım ısıtılmıştır. Ortama verilen sıcaklık ile alt kısım olarak ifade edilen bölge endotermik reaksiyon bölgesini ifade etmektedir. Ortama verilen ısıyı FDM bünyesine alarak depolamıştır. Benzer şekilde +20 C°'ye kadar ısıtılmış olan ortam +20 C°'de 2 dk. bekledikten sonra -20 C°'ye kadar +2 C°/dk tarama hızında adım adım soğutulmuştur. Ortamdan alınan

sıcaklık ile üst kısım olarak ifade edilen bölge ekzotermik reaksiyon bölgesini ifade etmektedir. FDM bu bölgede depolamış olduğu ısıyı serbest bırakmıştır.

Şekil 1.5'te verilen DSC analiz sonucunun ısıtma eğrisinde ergime noktasının 6.0 C° (1,1 C° ile 9,2 C° aralığında faz değiştirmekte), enerjisinin 318,8 mJ olduğu, soğutma eğrisinde donma noktasının 1.1 C° (-3,6 C° ile 3,3 C° aralığında faz değiştirmekte), enerjisinin de 343,7 mJ olduğu görülmektedir. Malzeme, katı fazdan sıvı faza geçerken 8,1 C°'lik bir genlikte erimeyi tamamlarken, sıvı fazdan katı faza geçerken 6,9 C°'lik bir genlikte katılaşmayı tamamlamıştır. Malzeme, belirtilen sıcaklık değerleri arasında faz değiştirme özelliği göstermektedir. Tüm DSC analiz eğrilerinin yorumlanması aynı şekilde olup, kullanılacak olan FDM'nin çalışma şartlarına uygunluğu bu şekilde belirlenmektedir.

1.2.4 FDM Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar

FDM'ler, 1.2.2 başlığında da özetlendiği üzere çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. FDM'lerin inşaat alanlarındaki kullanımı, FDM'nin asfalt, beton, çimento gibi yapı malzemelerine katılarak otoyolların performansının araştırılmasına yöneliktir. Araştırmaların temeli, FDM'nin otoyollarda kullanılmasının avantajlarını, bu amaç kapsamında FDM'lerin seçimini, sıcaklık düzenleme performansını, asfalt, beton, çimento ve karışımlarının performansı üzerindeki etkisini içermektedir. Halihazırda yol uygulamaları için yaygın olarak kullanılan FDM türleri arasında polietilen glikol, parafin, yüklü kompozit FDM ve mikrokapsüllenmiş FDM bulunmaktadır (Cabeza vd., 2011; Cao vd., 2013; Hu vd., 2009; Hu vd., 2009; Liu vd., 2010; Ma vd., 2000; Tan vd., 2013). Faz değiştiren malzemelerin asfalt ve beton yapı malzemelerinde kullanımı aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1.2.4.1 FDM'lerin Asfaltta Kullanılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Otoyol yapım aşamasındaki çevre sıcaklığının asfalt karışımı üzerinde son derece önemli bir etkisi vardır. Asfalt karışımının otoyol yapım mevkine taşınması ve uygulanması sırasında çevre sıcaklığı sebebi ile hızla ısı kaybetmesi söz konusu olduğunda, bu durum asfaltın ayrışmasına ve aşırı gözenekliliğe sebebiyet vermektedir. Bu durum, asfalt karışımının geçirgenliğini yaklaşık 2 katına çıkarmakta ve bu da asfaltın donma çözülme çevrimlerinde hasar görmesine sebep

olmaktadır. Bu da asfaltın ömrünü kısaltmaktadır (Li vd., 2017; Mohammad vd., 2016; Shepeng, 2012; Timm vd., 2001).

Yüksek enerji depolamaları, büyük faz değişim entalpi değerleri, ısı depolama ve serbest bırakma, sıcaklık düzenleme gibi özellikleri sebebi ile çok geniş alanlarda kullanılan faz değişim malzemeleri, bu özellikleri sayesinde yol mühendisliğinde kullanılabilirliğini mümkün kılmıştır (Ismail vd., 2022; Yeon ve Kim, 2018).

Bu amaçla, 21. yüzyılın başından bu yana bilim insanları, kaplamanın sıcaklığını düzenlemek ve kaplamayla ilgili sıcaklık sorunlarını önlemek için kaplamaya faz değiştiren malzemelerin dahil edilmesi konusu üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar (Chen vd., 2020; Tarefder ve Zaman, 2010; Wekumbura vd., 2007).

Ma vd. (2010) ve Ma vd. (2011), kompozit şekil değiştiren faz değiştiren malzemeyi (CPCM) asfalt karışımına ilave ederek karışımın yol performansını ve sıcaklık düzenleme etkisini incelemişlerdir. FDM'nin, asfalt karışımının düşük sıcaklıktaki çatlama direncini önemli ölçüde arttırdığını, karışımın sıcaklığının artması ve düşmesi sırasında sıcaklık değişim aralığını azaltarak sıcaklık düzenlemesinde etkili olduğunu göstermiştir.

Tan vd. (2013), kompozit faz değiştiren malzemeler hazırlayarak, bunların asfalt ile karıştırıldığındaki performansını incelemiş, Manning vd. (2015) ise FDM'li asfalt karışımlarının, FDM'siz asfalt karışımlarına göre soğuma hızlarının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

Refaa vd. (2018) ve Athukorallage vd. (2018), asfalt yollarda, asfalt-beton kaplamalarda, FDM'lerin varlığını hesaba katarak, gerçek hava koşulları altında çeşitli sayısal modeller geliştirilmişlerdir.

Faz değiştiren malzemeler (FDM)'in asfaltta kullanımları, özellikle, asfalt kaplamaların donmasını önlemek, asfalt kaplamalardaki yüksek ve düşük sıcaklıkları azaltmak gibi amaçlar kapsamındadır (Chen vd., 2012; Ma vd., 2019; Si vd., 2015). Cabeza vd. (2011), Dai (2022) ve Ma vd. (2000), mFDM'nin otoyol asfalt kaplamasına eklenmesinin, asfalt kaplamanın sıcaklığını etkili bir şekilde azaltabildiğini, böylece asfalt kaplamadaki tekerlek izi hasarını etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir.

Guo vd. (2000), FDM'nin asfalt karışımının ısı depolama kapasitesini arttırdığını, Wang (2021) ve Cheng (2019), FDM'nin asfalt karışımının yüksek sıcaklık

stabilitesini geliştirdiğini, Ma vd. (2011) ve Zhang vd. (2019) ise asfalt karışımının çevreye uyulanabilirliğini arttırdığını belirlemişlerdir. Tüm bunlara ilave olarak Liu vd. (2020), FDM'nin eklenmesinin asfaltın ısı depolama ve bırakma performansını iyileştirdiğini, Wei vd. (2019), asfaltın viskozitesini arttırdığını, Zhang vd. (2019) ise asfaltın ısı iletkenliğini ve ısı difüzyon katsayısını arttırdığını ortaya koymuşlardır.

Manning vd. (2015) ve Zhao vd. (2022), FDM'lerin asfalt özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış, sonuç olarak FDM'nin yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerini etkili bir şekilde geliştirebildiğini ve sızıntı olmaması koşulunda asfalt kaplamanın termal ayarlanabilirliğini artırabildiğini göstermiştir.

Ren ve Hao (2022) ile Wei vd. (2019) hazırladıkları mFDM'yi asfalt binder tabakasına ilave etmiş ve asfalt binderin düşük sıcaklık performansını geliştirdiğini ortaya koymuşlardır.

Donma zlmenin oluşturacağı hasarı önlemek amacıyla asfalt kaplamanın sıcaklığını düzenlemek için kullanılan faz değiştiren malzemelerin literatürü ve ilgili uygulama durumları, faz değiştiren malzemelerin kaplama sıcaklığını etkili bir şekilde düzenleyebildiğini, kaplamanın aşırısı sıcaklığını azaltabildiğini ve kaplamanın sıcaklık altındaki değişimini yavaşlatabildiğini göstermiştir.

1.2.4.2 FDM'lerin Betonda Kullanılması zerine Yapılan alışmalar

Soğuk bölgelerdeki beton yapılar genellikle donma çözülme nedeniyle hasar görmekte ve bu da hizmet ömrünü ciddi şekilde kısaltmaktadır (Li vd., 2017). Betonun bozulması, karbonatlaşma sürecini daha da hızlandırmakta ve elik korozyonuna neden olmaktadır (Hamze, 2014; Kuosa vd., 2014). Bu da beton yapıların servis ömrü boyunca performansını zayıflatıp, dayanıklılıklarını azaltmaktadır (Saydan vd., 2020). Uzun dönem problemi olan donma çözülme çevrimleri betonun yapısında ciddi problemler meydana getirmektedir. Meydana gelen bu problemlerin iyileştirilmesi amacıyla literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. (Kim vd., 2021; Wang vd., 2018; Zhang vd., 2020). Ancak, yapılan iyileştirme çalışmaları uzun dönemde yeterli görülmemiştir (Wang vd., 2020).

Klasik katkı malzemelerinin dışında, termal özelliği olan FDM'nin beton üzerinde kullanılabilirliği araştırılmış ve mevcut olan birçok çalışma, betona faz değiştiren malzeme (FDM) eklemenin, betonun i sıcaklığını ayarlama da etkili ve

uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir (Nazir vd., 2019; Sakulich ve Bentz, 2011; Shen vd., 2020; Stoll vd., 1996).

Stoll vd. (1996), FDM'lerin beton köprülerin donma tehlikesini önemli ölçüde azaltabildiğini belirtmiştir. Bentz ve Turpin (2007), FDM ilave ettiği betonların donma çözülme çevrimlerini incelemiş ve bilgisayar programları ile simülasyon geliştirmiştir. Sakulich ve Bentz (2011), köprülerde FDM'li beton kullanmanın olumlu sonuçlar doğurduğunu ortaya koymuşlardır.

FDM'lerin betonda kullanımları, özellikle, beton kaplamalardaki buz ve karların erimesini önlemek, kütle betonunun sıcaklık kontrolüne ve ısı yalıtımına izin vermek üzerinedir (Farnam vd., 2016; Ramakrishan vd., 2015; Young vd., 2017).

Yeon ve Kim (2018) ile Stefan vd. (2018), FDM kullanımının, kar eritme, buz çözme, sıcaklık dalgalanmasını azaltma, beton kaplama ve köprü döşemesi için antifriz genişmesinde de etkili bir şekilde uygulanabilirliğini, Urgessa vd. (2019), betona ilave edilen FDM'nin, kış mevsiminde betonun hem iç sıcaklık dalgalanmasını hem de donma çözülme çevrimlerinden oluşabilecek olumsuz sonuçları etkili bir şekilde azaltabileceğini, Memon vd. (2015), Esmaeeli vd. (2018) ile Zuo vd. (2020)'de FDM'nin beton iç sıcaklığını ve soğuma hızını değiştirerek durabiliteyi arttırdığını ortaya koymuştur. Pilehvar vd. (2019), mFDM'in goepolimer ve Portland çimentolu betondaki etkilerini inceleyerek, mFDM'in DÇ çevrimlerinden sonra yapı malzemesini koruduğunu ortaya koymuşlardır.

Donma çözülmenin oluşturacağı hasarı önlemek amacıyla betonun sıcaklığını düzenlemek için kullanılan faz değiştiren malzemelerin literatürü ve ilgili uygulama durumları, faz değiştiren malzemelerin betonun iç sıcaklığını etkili bir şekilde düzenleyebildiğini ve donma çözülme çevrimlerinden oluşabilecek hasarın en aza indirildiğini göstermiştir.

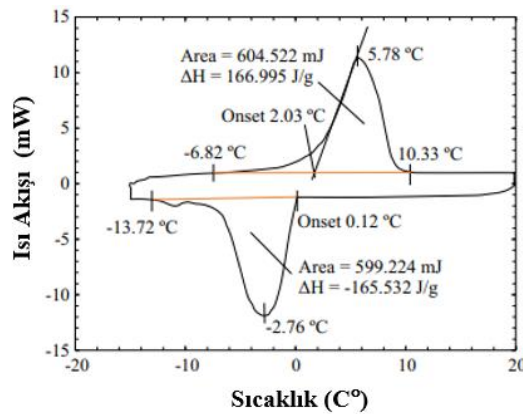
FDM'nin asfalt, beton ve çimentoya karıştırılması ile yapılan deneysel çalışmalar soğuk bölgelerdeki zeminlerin donma çözülme performansının iyileştirilmesi için teorik bir temel sağlamıştır. Mühendislik yapılarının yüksek ve düşük sıcaklık dalgalanmalarının kontrolünde umut verici sonuçlar göstermiştir. Böylece, FDM'nin zeminin donma çözülme performansını iyileştirmek için kullanılabileceğini de ortaya koymuştur.

1.2.4.3 FDM'lerin Zeminde Kullanılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin bozulduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Donma çözülmenin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılabilmesi maksadıyla, zemine FDM ilave edilerek yapılan deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Donma çözülme çevrimlerinin zemin üzerinde meydana getirdiği olumsuz durumların iyileştirilebilmesi amacıyla, FDM'nin katkı malzemesi olarak zemin içinde kullanılabilirliği, Mahedi vd. (2019) tarafından başlamıştır.

Mahedi vd. (2019), Iowa Turin'den temin ettikleri %24 likit limit, %20 plastik limit, %71 silt, %11 kil içeriğine sahip, dona karşı hassasiyeti yüksek olan düşük plastisiteli silt (ML) üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, beyaz renkli, çekirdek malzemesi parafin-organik olan ve oda sıcaklığında likit halde bulunan kapsülsüz FDM (pPCM) ile aynı çekirdek malzemesine sahip plastik bir kapsül ile mikrokapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) kullanmışlardır. FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Mahedi vd. (2019)'da, çekirdek yapısının aynı olması sebebi ile mPCM ve pPCM üzerinde ayrı ayrı DSC analizi yaptırmak yerine sadece pPCM üzerinde DSC analizinin yaptırılmasının yeterli olacağını belirtmiştir (Şekil 1.6)



Şekil 1.6 DSC analiz sonuçları (Mahedi vd. (2019))

İki farklı formda bulunan FDM'nin davranışının incelenmesi sırasında, likit FDM'nin sızıntıya sebep olduğu tespit edilmiş, bu kapsamda mikrokapsülleme

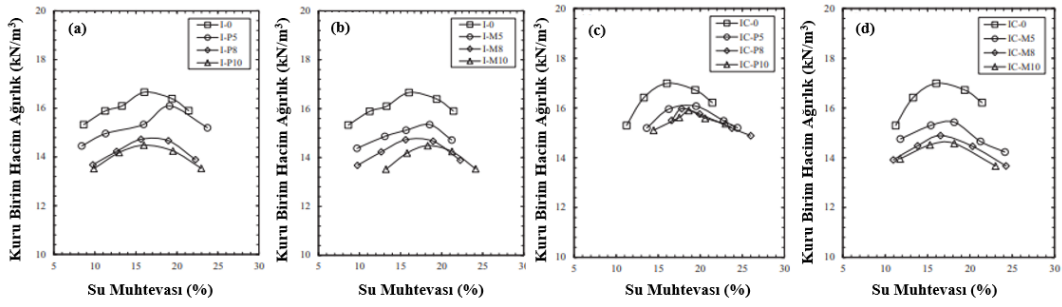
teknığının yanı sıra halihazırda devam eden deneysel çalışmalarında ilave bir katkı malzemesi olarak C sınıfı uçucu kül tercih etmişlerdir.

mPCM ve pPCM, zemine kuru ağırlığının %5, %8 ve %10'u kadar, C sınıfı uçucu kül ise zemine kuru ağırlığının %8'i kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Mahedi vd. (2019), donma çözülme çevrimleri uygulamadan önce hazırlanmış oldukları karışımlar üzerinde Atterberg limitleri (likit limit ve plastik limit) ve standart kompaksiyon deneyleri yaparak kapsüllü (mPCM) ve kapsülsüz FDM (pPCM)'in zemin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kompaksiyon deneylerinden elde ettikleri bulguları Tablo 1.5'teki gibi, karışımların kompaksiyon davranışlarını Şekil 1.7a, 1.7b, 1.7c ve Şekil 1.7d'deki gibi, Atterberg limitlerinden elde ettikleri bulguları ise Şekil 1.8a ve Şekil 1.8b'de gibi sunmuşlardır.

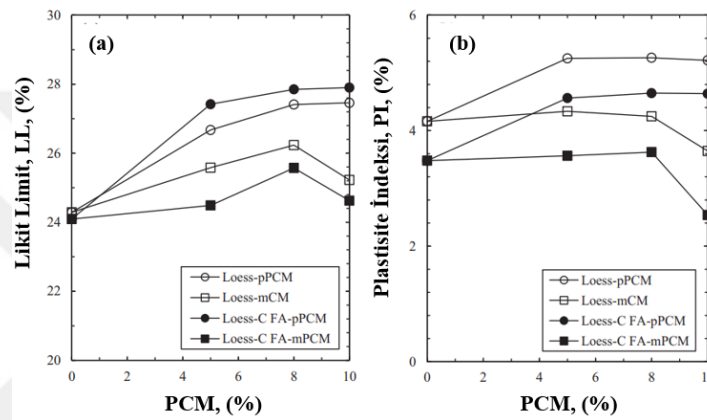
Tablo 1.5 Kompaksiyon sonuçları (Mahedi vd. (2019))

<i>Karışım Tipi</i>	<i>ID (%0 C)</i>	<i>γ_k (kN/m³)</i>	<i>w_{opt} (%)</i>	<i>ID (%8 C)</i>	<i>γ_k (kN/m³)</i>	<i>w_{opt} (%)</i>
C Sınıfı Uçucu Kül (%)	I-0	16,7	16,5	IC-0	16,9	16,4
pPCM (%)	I-P5	16,1	19,1	IC-P5	16,1	18,7
	I-P8	14,8	17,1	IC-P8	16,0	18,2
	I-P10	14,5	16,1	IC-P10	15,9	18,6
mPCM (%)	I-M5	15,4	18,2	IC-M5	15,5	17,4
	I-M8	14,8	17,0	IC-M8	14,9	16,5
	I-M10	14,5	16,2	IC-M10	14,7	17,0



a) Zemin-pPCM, b) Zemin-mPCM, c) Zemin-pPCM-uçucu kül, d) Zemin-mPCM-uçucu kül

Şekil 1.7 Kompaksiyon davranışına FDM (PCM) etkisi (Mahedi vd. (2019))

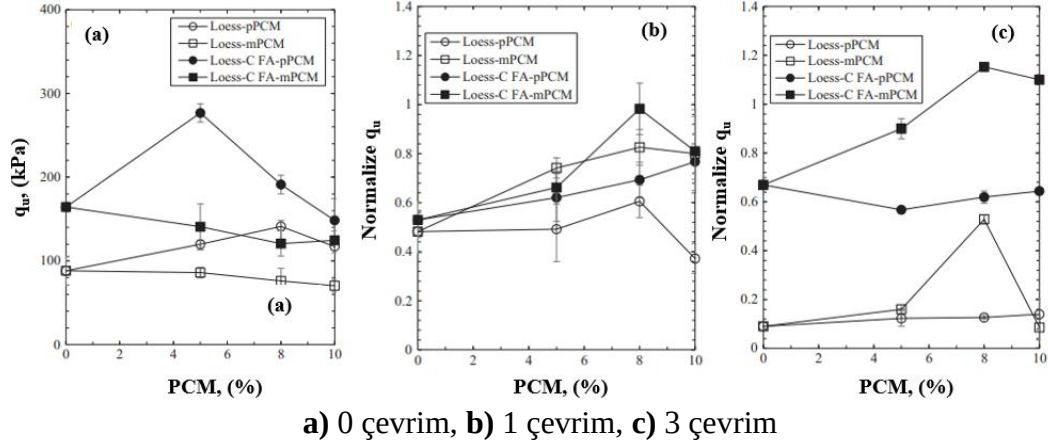


a) Likit limit-PCM ilişkisi, b) Plastisite indeksi-PCM ilişkisi

Şekil 1.8 Atterberg limitlerine FDM (PCM) etkisi (Mahedi vd. (2019))

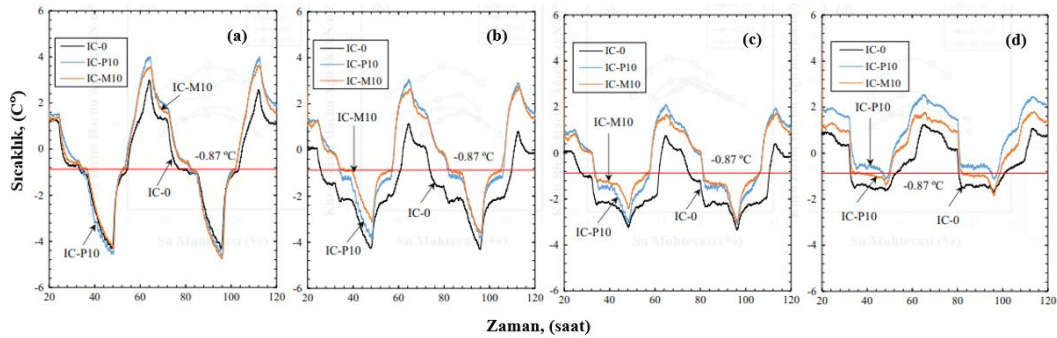
Tablo 1.5’te verilen karışımlar üzerinde yapmış oldukları likit limit, plastik limit ve kompaksiyon deneyleri ile mPCM, pPCM ve C sınıfı uçucu külün farklı oranlarda zemine ilave edilmesi ile zemin üzerindeki etkilerini, donma çözülme çevrimleri olmaksızın incelemişlerdir.

Mahedi vd. (2019), kompaksiyon parametrelerini ($\gamma_{kmax.}$, w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 24 saat, $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 24 saat bekleterek 0, 1, 3 olmak üzere 3 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) verilerini ise her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.9a, 1.9b ve Şekil 1.9c’deki gibi sunmuşlardır.



Şekil 1.9 q_u -PCM çevrim ilişkisi (Mahedi vd. (2019))

Mahedi vd. (2019), aynı zamanda her bir donma ve çözülme çevriminin ardından deney numunelerinin hacim değişimlerini de ölçerek, donma çözülme çevrimlerinin pPCM ve mPCM katkılı zemin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Donma çözülme çevrimleri için uygulanan sınır sıcaklık değerleri ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$) kabin içerisinde manual/otomatik olarak ölçülüyor olsa da, numunelerin donma çözülme gösterip göstermediğinin belirlenebilmesi amacıyla sıcaklık ölçümlerinin numune bazında da yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, bir kabin içerisinde donma çözülme çevrimleri için bekletilen numunelerin hedeflenen sıcaklık değerlerine ulaşip ulaşmadığı yapılan sıcaklık ölçümleri ile belirlenmelidir. Bu amaçla, Mahedi vd. (2019) de, donma çözülme çevrimlerine maruz bıraktıkları numunelerin farklı derinliklerinde (d) sıcaklık ölçümleri yapmış, elde ettikleri verileri Şekil 1.10a, Şekil 1.10b, Şekil 1.10c ve Şekil 1.10d'deki gibi sunmuşlardır.

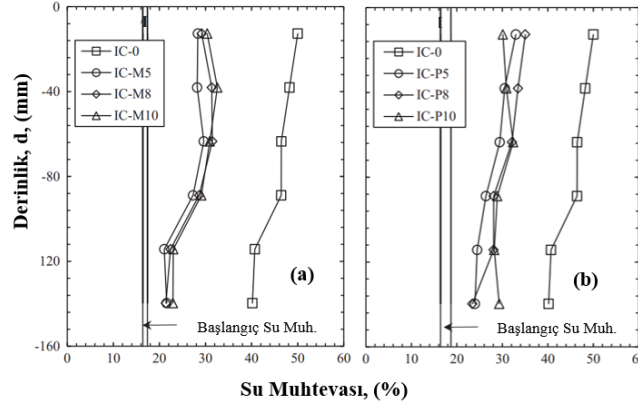


a) $d=63.5\text{ mm}$, **b)** $d=88.9\text{ mm}$, **c)** $d=114.3\text{ mm}$, **d)** $d=139.7\text{ mm}$

Şekil 1.10 Sıcaklık ölçümleri (Mahedi vd. (2019))

Sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra Mahedi vd. (2019), donma çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerin çevrimler sonundaki su muhtevalarının derinlikle

değişimini de incelemiş, ve elde ettikleri ilişkileri Şekil 1.11a ve Şekil 1.11b'deki gibi sunmuşlardır.

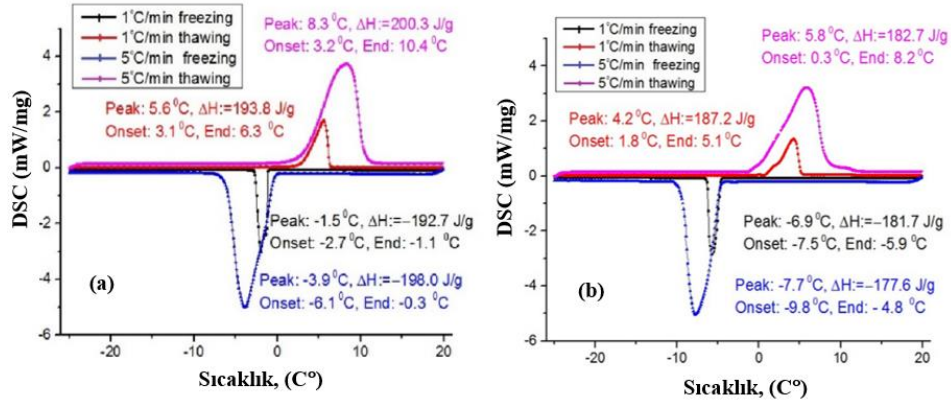


a) mPCM'li numuneler, b) pPCM'li numuneler

Şekil 1.11 Su muhtevasının derinlik ile değişimi (Mahedi vd. (2019))

Mahedi vd. (2019)'un yapmış oldukları bu detaylı çalışma, taban zemini üzerindeki donma çözülme etkisini kontrol etmede FDM'lerin kullanımını önemli ölçüde desteklemektedir.

Kravchenko vd. (2020), Mahedi vd. (2019) çalışmalarını baz alarak, Çin Gansu Province Lanzhou'dan temin ettikleri %26,57 likit limit, %15,88 plastik limit değerine sahip siltli kil üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla birtakım deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, beyaz renkli, çekirdek malzemesi parafin-organik (noktadekan) olan ve melamine formaldehyde (MF) polimerik kabuk ile kapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) ile oda sıcaklığında likit halde bulunan kapsülsüz FDM (pPCM) kullanmışlardır. FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizleri ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Kravchenko vd. (2020), tarama hızının DSC analiz sonuçları üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek adına, analizleri 1 °C/dk ve 5 °C/dk olacak şekilde iki farklı tarama hızında gerçekleştirmiştir. NETZSCH DSC 204F1 cihaz kullanılarak gerçekleştirilen DSC analiz sonuçlarını Şekil 1.12'deki gibi sunmuşlardır.

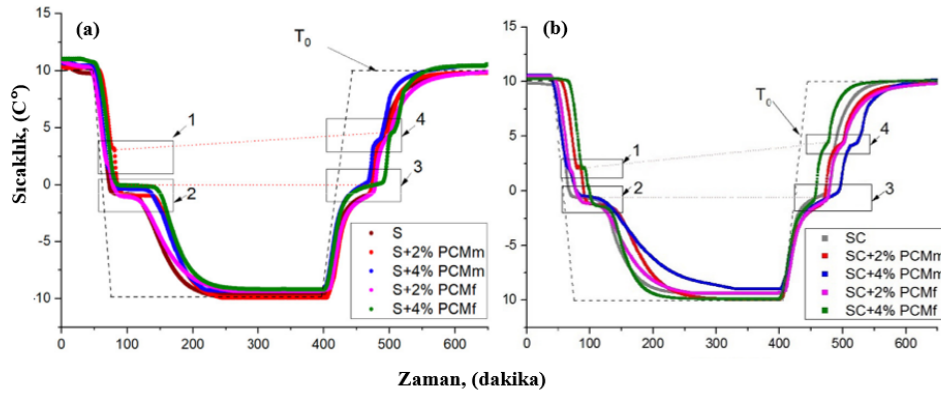


a) pPCM-DSC analiz sonuçları, **b)** mPCM-DSC analiz sonuçları

Şekil 1.12 DSC analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2020))

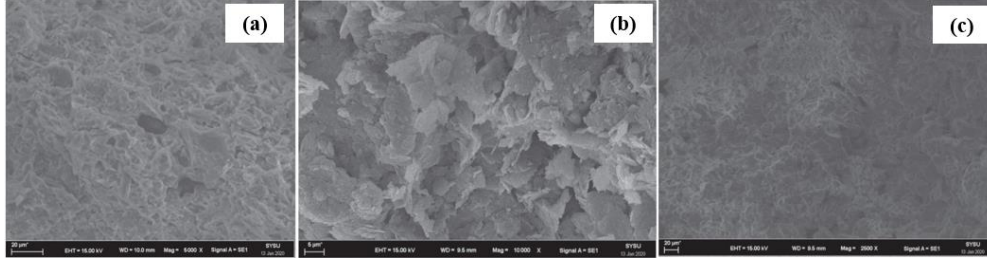
Kravchenko vd., (2020), iki farklı formda bulunan FDM'nin davranışının incelenmesi sırasında, ilave bir katkı malzemesi olarak geleneksel Portland çimentosu tercih etmişlerdir. mPCM ve pPCM, zemine kuru ağırlığının %2, %4'ü kadar, geleneksel Portland çimentosu ise zemine kuru ağırlığının %4'ü kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Kravchenko vd. (2020), hazırladıkları karışımlar üzerinde DSC analizlerinin yanı sıra sıcaklık ölçümleri ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık ölçümleri, dış çevre sıcaklığının değişimi sırasında numunenin iç sıcaklık değişiminin gözlemlenebilmesi amacıyla özel TMS8035-R40 likit termal tank ve data ölçerler kullanılarak yapılmıştır (Şekil 1.13a ve 1.13b). SEM analizleri ise, karışımların farklı büyüklükteki görüntülerinin alınabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.14a ve Şekil 1.14b).



a) çimentolu numuneler, **b)** çimentosuz numuneler

Şekil 1.13 Sıcaklık ölçümleri (Kravchenko vd. (2020))



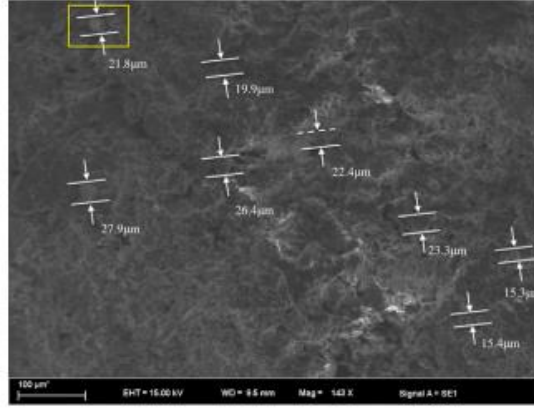
a) saf zemin (2500x), **b)** %4 çimentolu numuneler (10000x), **c)** %4pFDM’li numuneler (5000x)

Şekil 1.14 SEM analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2020))

Kravchenko vd., (2020), yapmış oldukları tüm analizler ile, zemin nemi, zeminin termal iletkenliği, melamin formaldehit polimerik kabuğun termal iletkenliği, zeminin başlangıç sıcaklığı, FDM’in başlangıç sıcaklığı vb. çeşitli sınır koşullarını dikkate alarak, çevre sıcaklığının değişiminden dolayı zeminin termal değişimlerini incelemişlerdir.

Kravchenko vd. (2021), FDM’nin faz değişimi sırasında ısı biriktirme ve üretme kabiliyetine sahip olması sebebiyle, FDM’nin alt zeminin mekanik davranışlarını düzenlemede etkili olduğunu, bu sayede zemin ile birlikte kullanılabilirliğini 2020 yılında yapmış olduğu çalışmasında önermiştir. Kravchenko vd. (2021), gerçekleştirdikleri SEM ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizleri ile de FDM mikrokapsüllerinin zemindeki konumunu gözlemlemişlerdir.

Yapmış oldukları analizlerde, beyaz renkli, çekirdek malzemesi parafin (noktadekan) olan ve polymethyl methacrylate ile silicon nitride’den oluşan polimer bir kabuk ile kapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) kullanmışlardır. FDM’nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi için gerekli olan DSC analiz verileri, 2020 yılındaki çalışmalarında yaptırmış oldukları DSC analiz sonuçlar olup, Şekil 1.12b’de sunulmuştur. SEM ve XPS analizleri ise, mikrokapsüllerin konumunun ve boyutunun kesin olarak belirlenmesi amacıyla yaptırılmıştır (Şekil 1.15).

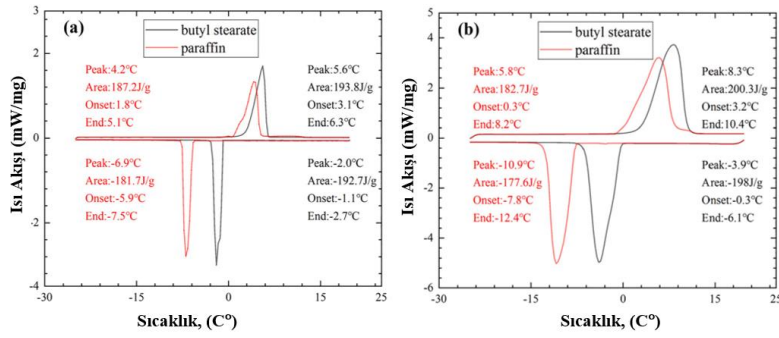


Şekil 1.15 SEM ve XPS analiz sonuçları (Kravchenko vd. (2021))

Elde edilen veriler ve dijital işleme yazılımları kullanılarak, SEM ve XPS analiz görüntülerindeki mikrokapsüllerin konumu, makro ölçekli model geometrisine aktarılmıştır. Makro ölçekli model, dış sıcaklığın değişmesinin mFDM’li zemin karışımlarının sıcaklık değişimi üzerindeki etkisini tahmin etmeyi mümkün kılmıştır. Bu sayede, mFDM’nin zemin sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelde bir çok noktanın analizi sonucunda; mFDM’nin, sadece kendi tepe sıcaklığını düşürmekle kalmayıp, çevredeki zeminin tepe sıcaklığını da düşürdüğü, sıcaklık değişim oranında azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mFDM’nin zeminin sıcaklık rejimi üzerindeki etkisinin tatmin edici olduğu ve sıcaklık problemlerinin oluşturabileceği problemlerin çözümünde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Rao vd. (2021), Lanzhou’dan temin ettikleri %26,57 likit limit, 15,88 plastik limit değerine sahip, dona karşı hassasiyeti olan düşük plastisiteli kil (CL) üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin ettikleri, farklı çekirdek malzemesine sahip (parafin (P-PCM) ve bütül stearate (B-PCM)), nanosilika aerogel içerisinde kapsüllenmiş 2 farklı FDM kullanmışlardır.

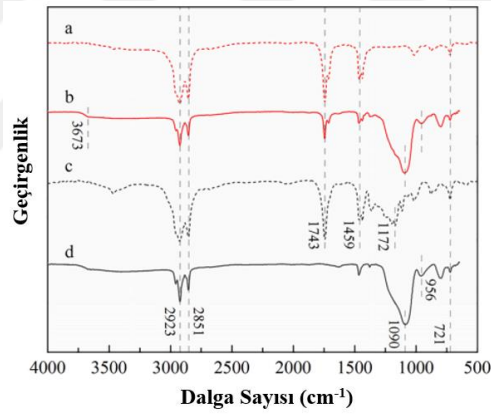
FDM’nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM’nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Rao vd. (2021), tarama hızının DSC analiz sonuçları üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek adına, Kravchenko vd. (2020) gibi, analizleri 1 °C/dk ve 5 °C/dk olacak şekilde iki farklı tarama hızında gerçekleştirmiştir (Şekil 1.16).



a) 1 C°/dk tarama hızı analiz sonuçları, b) 5 C°/dk tarama hızı analiz sonuçları

Şekil 1.16 DSC analiz sonuçları-DÇ öncesi (Rao vd. (2021))

Rao vd. (2021), kullanmış olduğu FDM'ler üzerinde, organik bileşiklerin kimyasal yapılarını atomların titreşimlerine bağlı olarak belirlemede kullanılan analizlerden biri olan FT-IR (Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi) analizlerini gerçekleştirmiş, böylece, farklı fonksiyonel gruplara ve kimyasal bağlara sahip atomları belirlemiştir (Şekil 1.17).



a) parafin, b) P-PCM, c) bütül stearat, d) B-PCM

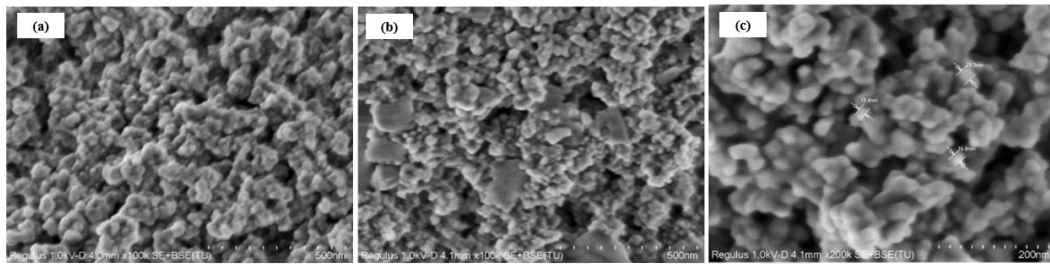
Şekil 1.17 FT-IR analiz sonuçları (Rao vd. (2021))

Rao vd. (2021), FDM'lerin kimyasal yapılarını FT-IR analizleri ile incelemesinin yanı sıra, malzeme üzerinde XPS analizleri yaparak elementsel bileşimi de gözlemlemiş ve sonuçları Tablo 1.6'daki gibi sunmuşlardır.

Tablo 1.6 XPS analiz sonuçları (Rao vd. (2021))

<i>Karışım Tipi</i>	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Si</i>
B-PCM	26,63	45,91	26,92
P-PCM	6,39	58,98	34,01

Rao vd. (2021), FDM'lerin termal, kimyasal özelliklerinin detaylı bir biçimde incelenebilmesi amacıyla FDM'ler üzerinde XPS, DSC, FT-IR analizleri gerçekleştirmişlerdir. FDM'lerin morfolojik özelliklerini de SEM analizleri ile incelemiş, Şekil 1.18'deki gibi sunmuşlardır.

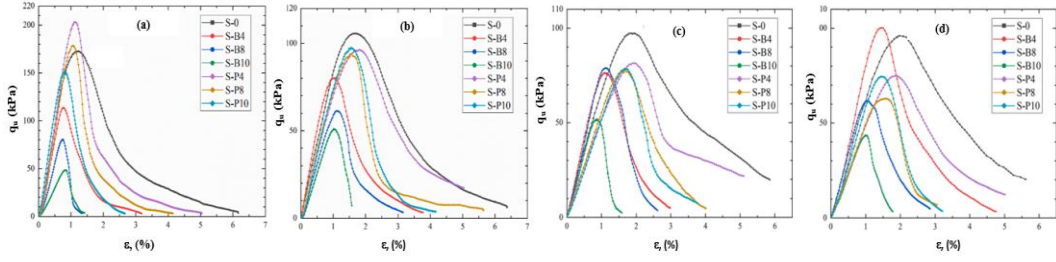


a) B-PCM, b) B-PCM ve P-PCM, c) P-PCM

Şekil 1.18 SEM analiz sonuçları (Rao vd. (2021))

İki farklı formda bulunan FDM'nin davranışının incelenmesi sırasında, herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamıştır. B-PCM ve P-PCM, zemine kuru ağırlığının %4, %8 ve %10'u kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

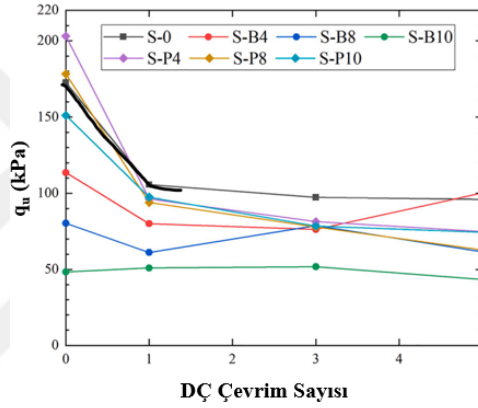
Rao vd. (2021), kompaksiyon parametrelerini ($\gamma_{kmax.}$, w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, -20 C°'de 12 saat, +20 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 5 olmak üzere 4 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini ise her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.19a, Şekil 1.19b, Şekil 1.19c ve Şekil 1.19d'deki gibi sunmuşlardır.



a) 0 çevrim, b) 1 çevrim, c) 3 çevrim, d) 5 çevrim

Şekil 1.19 q_u - ε ilişkisi (Rao vd. (2021))

Rao vd. (2021), Şekil 1.19’da verilen deney verilerini tek bir grafik altında toplayıp serbest basınç mukavemeti (q_u) ile donma çözülme çevrimleri arasındaki ilişkiyi Şekil 1.20’deki gibi sunmuşlardır.



Şekil 1.20 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Rao vd. (2021))

Rao vd. (2021), elde ettiği serbest basınç mukavemeti verilerini kullanarak FDM katkılı zeminin donma önleme performansını değerlendirebilmek için (1.2) eşitliğindeki gibi boyutsuz bir K parametresi tanımlamıştır.

$$K = \frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100(\%) \quad (1.2)$$

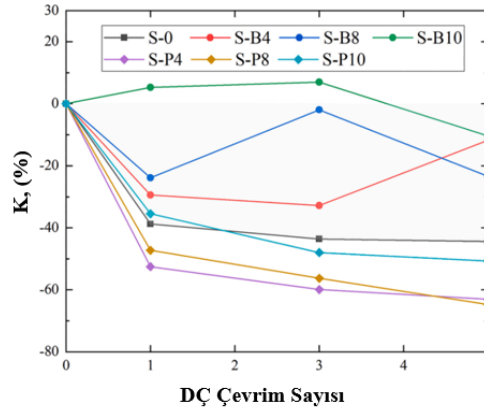
Formülde yer alan;

σ_n : Donma çözülme çevrimine maruz kalan numunenin serbest basınç mukavemeti

n : Donma çözülme çevrim sayısı

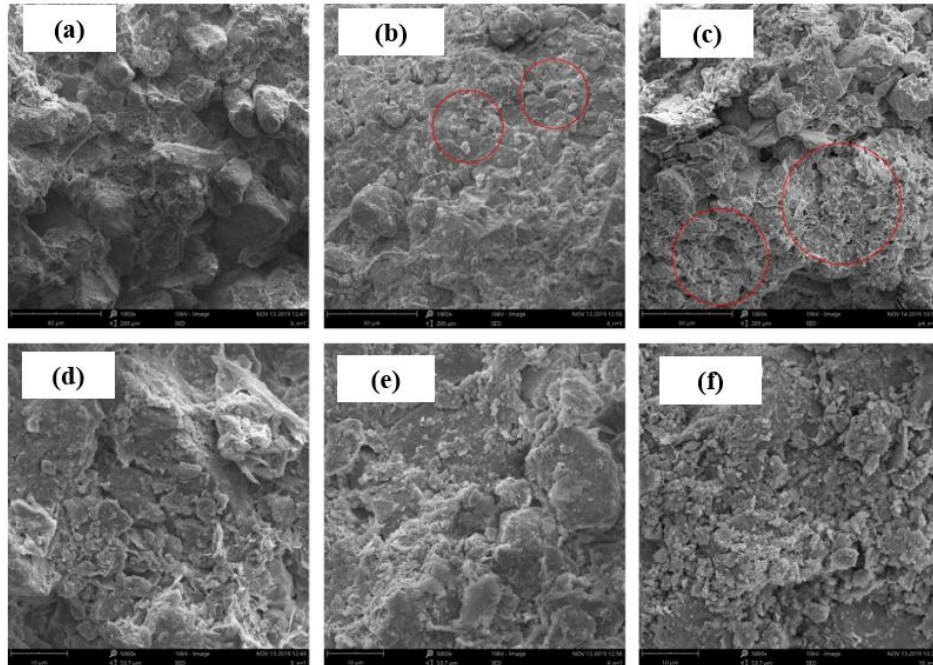
σ_0 : Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan numunenin serbest basınç mukavemeti’ni temsil etmektedir.

Rao vd. (2021), serbest basınç mukavemeti (q_u) değerleri ile elde ettiği K parametresinin donma çözülme çevrimleri ile ilişkisini Şekil 1.21'deki gibi sunmuştur.



Şekil 1.21 K-DÇ çevrim ilişkisi (Rao vd. (2021))

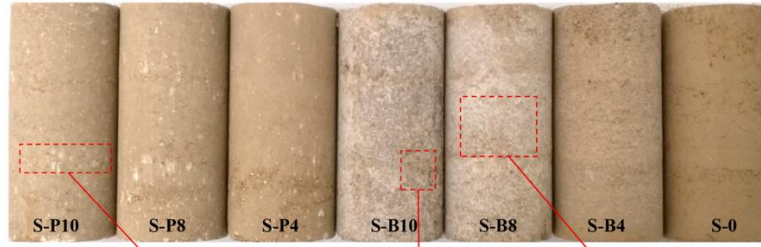
Rao vd. (2021), Şekil 1.18'de sunduğu ve sadece FDM üzerinde yapmış olduğu SEM analizlerini, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan %4 ve %8 B-PCM ve P-PCM katkılı karışımlar için de gerçekleştirmiş, böylece donma çözülme çevrimlerinin zeminin morfolojik formu üzerindeki etkilerini farklı büyütme altında (1000x ve 5000x) incelemiştir (Şekil 1.22).



a) S-0 (1000x), b) S-B4 (1000x), c) S-P4 (1000x), d) S-0 (5000x), e) S-B4 (5000x), f) S-B10 (5000x)

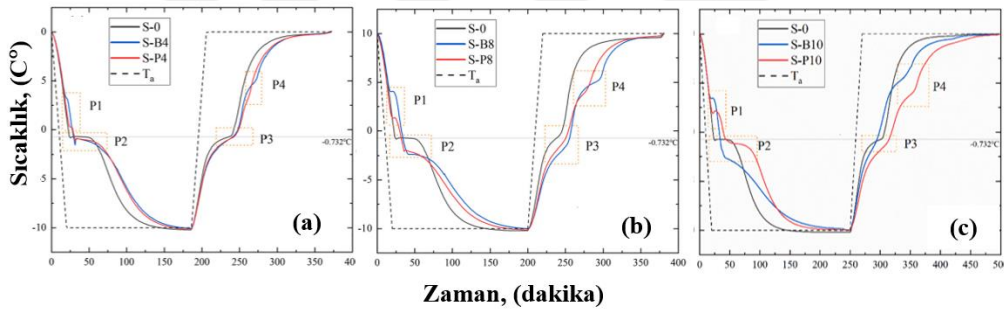
Şekil 1.22 SEM analiz sonuçları-DÇ sonrası (Rao vd. (2021))

Bunun yanı sıra, serbest basınç deneyleri için hazırlamış olduğu tüm karışımların deney öncesi görüntülerini çekerek FDM'lerin zemin içerisindeki yerleşimini de görselleştirmiştir (Şekil 1.23).



Şekil 1.23 Deney öncesi görseller (Rao vd. (2021))

Rao vd. (2021) de, Mahedi vd. (2019) gibi, bir kabin içerisinde donma çözülme çevrimleri için bekletilen deney numunelerinin hedeflenen sıcaklık değerlerine ulaşip ulaşmadığını yapmış olduğu sıcaklık ölçümleri ile kontrol etmiştir. Sıcaklık ölçümlerini Şekil 1.24'teki gibi sunmuştur.



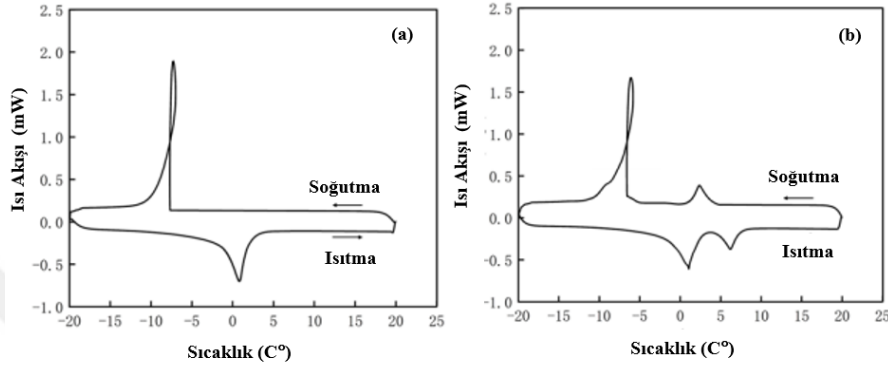
a) %4 katkı, b) %8 katkı, c) %10 katkı

Şekil 1.24 Sıcaklık ölçümleri (Rao vd. (2021))

Chen vd. (2021), Xinjiang'den temin ettikleri %52,60 likit limit, %18,40 plastik limit değerine sahip, yüksek plastisiteli kil (CH) üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla birtakım deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, kirli beyaz renkli, çekirdek malzemesi parafin mumu olan ve melamin reçine ile mikrokapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) kullanmışlardır. FDM üzerinde yaptırıkları analizler sonunda kapsüllü FDM'nin parçacık boyutunun 10 μ m olduğunu tespit etmişlerdir. mFDM, zemine kuru ağırlığının %5, %8 ve %10'u kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların

karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Çalışmalarında ilave bir katkı malzemesi kullanmamışlardır.

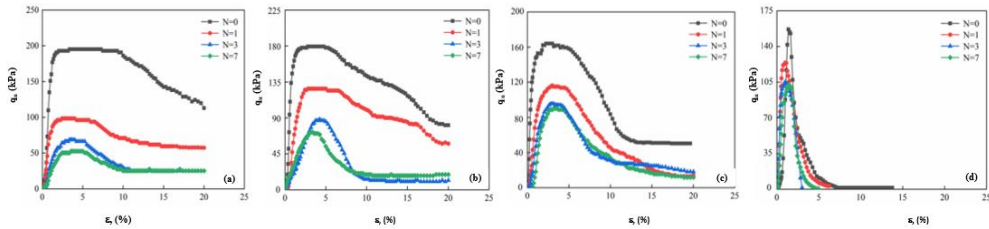
FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir (Şekil 1.25). DSC analizlerini, katkısız ve %10 mFDM katkılı zemin karışımı üzerinde gerçekleştirmişlerdir.



a) Katkısız zemin, b) %10 mFDM katkılı zemin

Şekil 1.25 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2021))

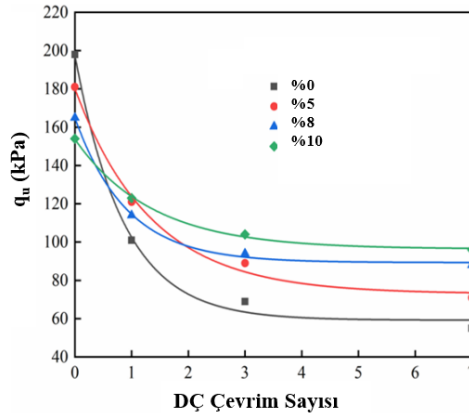
Chen vd. (2021), kompaksiyon parametrelerini (γ_{kmax} , w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, -20 C°'de 12 saat, +20 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 7 olmak üzere 4 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini ise her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.26a, Şekil 1.26b, Şekil 1.26c ve Şekil 1.26d'deki gibi sunmuşlardır.



a) %0 katkı, b) %5 katkı, c) %8 katkı, d) %10 katkı

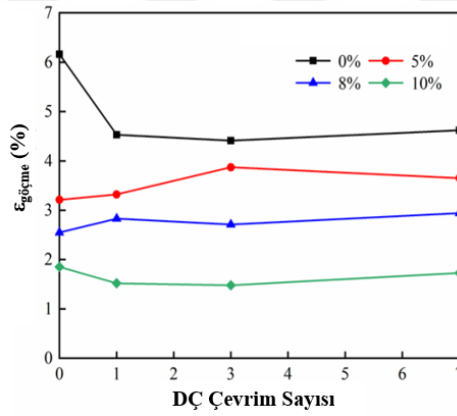
Şekil 1.26 q_u - ϵ ilişkisi (Chen vd. (2021))

Chen vd. (2021), Şekil 1.26’da verilen deney verilerini tek bir grafik altında toplayıp serbest basınç mukavemeti (q_u) ile donma çözülme çevrimleri arasındaki ilişkiyi Şekil 1.27’deki gibi sunmuşlardır.



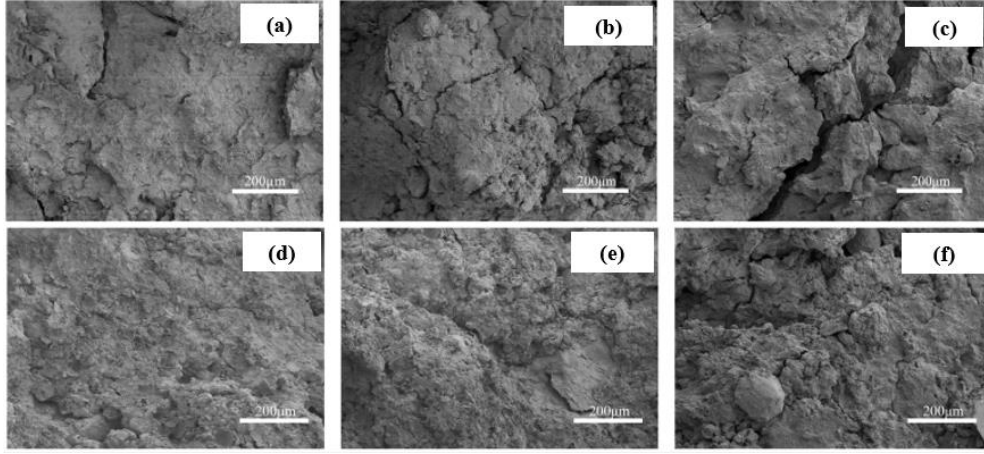
Şekil 1.27 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))

Chen vd. (2021), yapmış oldukları serbest basınç deneylerinde elde edilen göçme şekil değiştirme ($\epsilon_{göçme}$) değerlerini donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak incelemiş, ilişkileri Şekil 1.28’deki gibi sunmuştur.



Şekil 1.28 $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))

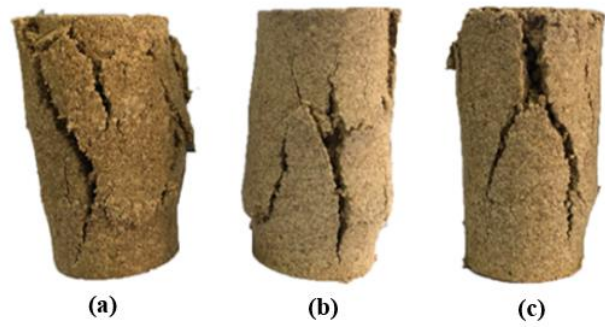
Chen vd. (2021), donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkısız (%0) ve katkılı (%8) zemin üzerinde SEM analizlerini yapmış, böylece donma çözülmenin zeminin morfolojik formu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Şekil 1.29).



a) %0 katkı (0 çevrim), **b)** %0 katkı (1 çevrim), **c)** %0 katkı (7 çevrim)
d) %8 katkı (0 çevrim), **e)** %8 katkı (1 çevrim), **f)** %8 katkı (7 çevrim)

Şekil 1.29 SEM analiz sonuçları-DÇ sonrası (Chen vd. (2021))

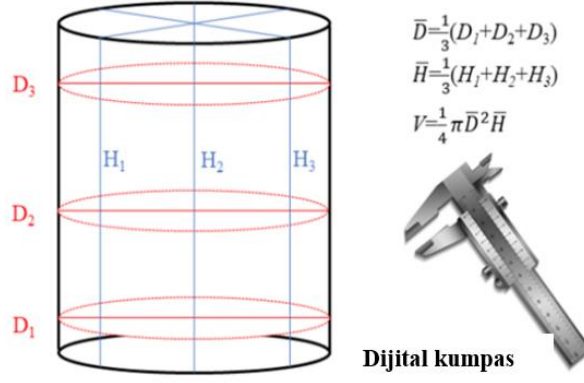
Chen vd. (2021), SEM analizlerinin yanı sıra, serbest basınç deneylerinin sonunda tüm katkı oranları için deney numunelerinin görüntülerini çekerek FDM'lerin zeminin göçme mekanizması üzerindeki etkilerini görselleştirmiştir (Şekil 1.30).



a) %5 katkı, **b)** %8 katkı, **c)** %10 katkı

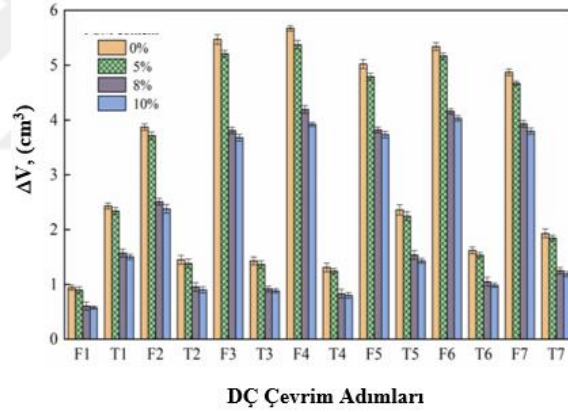
Şekil 1.30 Deney sonrası görseller (Chen vd. (2021))

Chen vd. (2021), ayrıca, serbest basınç deneylerinde kullandıkları tüm deney numunelerinin hacim değişimlerini (ΔV) ölçmüştür. Bu doğrultuda, Şekil 1.31'de görüldüğü gibi Lu vd. (2019)'un önermiş olduğu hacim değişim hesabını dikkate almıştır.



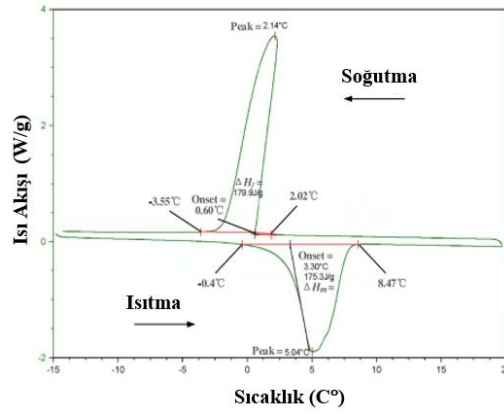
Şekil 1.31 Hacim değişim hesabı (Lu vd. (2019))

Chen vd. (2021), Lu vd. (2019)'un önermiş olduğu hacim hesabını dikkate alarak, her bir numunenin çapını, yüksekliğinin 1/3'ü boyunca 3 kez dijital kumpas ile ölçmüş, numunenin yüksekliğini de 3 farklı yerden ölçerek, ortalama değer almıştır. Numunenin hacim değişimini verilen formüle göre hesaplayarak meydana gelen hacim değişimlerini Şekil 1.32'deki gibi sunmuşlardır.



Şekil 1.32 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2021))

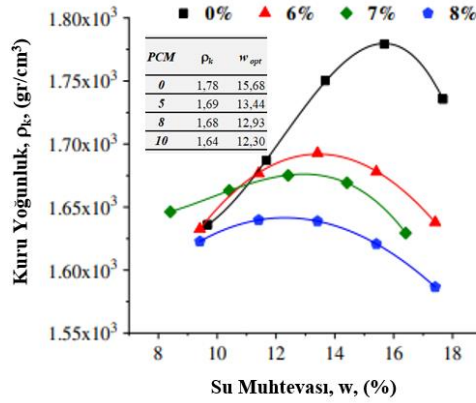
Liu vd. (2021), temin ettikleri %36.91 likit limit, %17.30 plastik limit, %45.30 silt, %34.30 kil, %20.40 kum içeriğine sahip zemin üzerinde FDM'nin etkilerini inceleyebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, parafin bazlı FDM kullanmışlardır. FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir (Şekil 1.33)



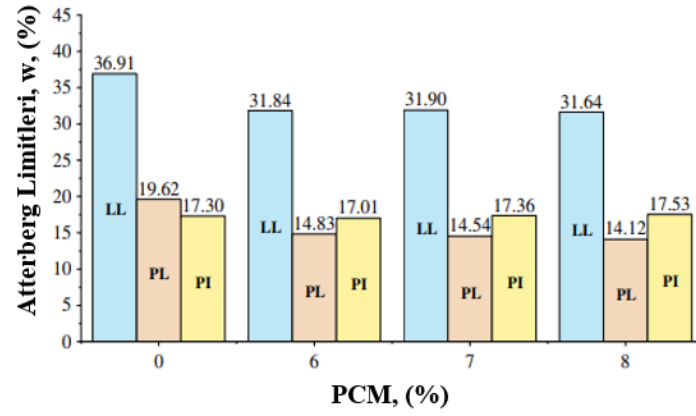
Şekil 1.33 DSC analiz sonuçları (Liu vd. (2021))

FDM, zemine kuru ağırlığının %6, %7 ve %8'i kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Liu vd. (2021), hazırlamış oldukları karışımlar üzerinde Atterberg limitleri (likit limit ve plastik limit) ve standart kompaksiyon deneyleri yaparak FDM'nin zemin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kompaksiyon deneylerinden elde ettikleri bulguları Şekil 1.34'teki gibi, Atterberg limitlerinden elde ettikleri bulguları ise Şekil 1.35 'deki gibi sunmuşlardır.

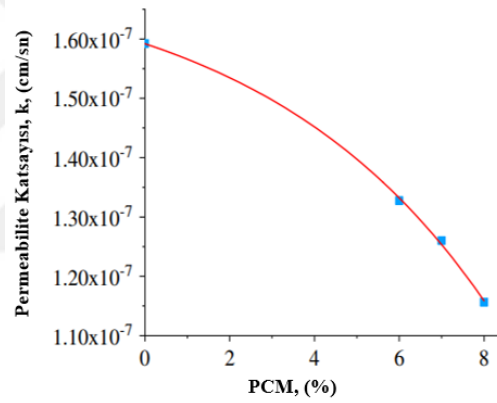


Şekil 1.34 Kompaksiyon davranışına FDM (PCM) etkisi (Liu vd. (2021))



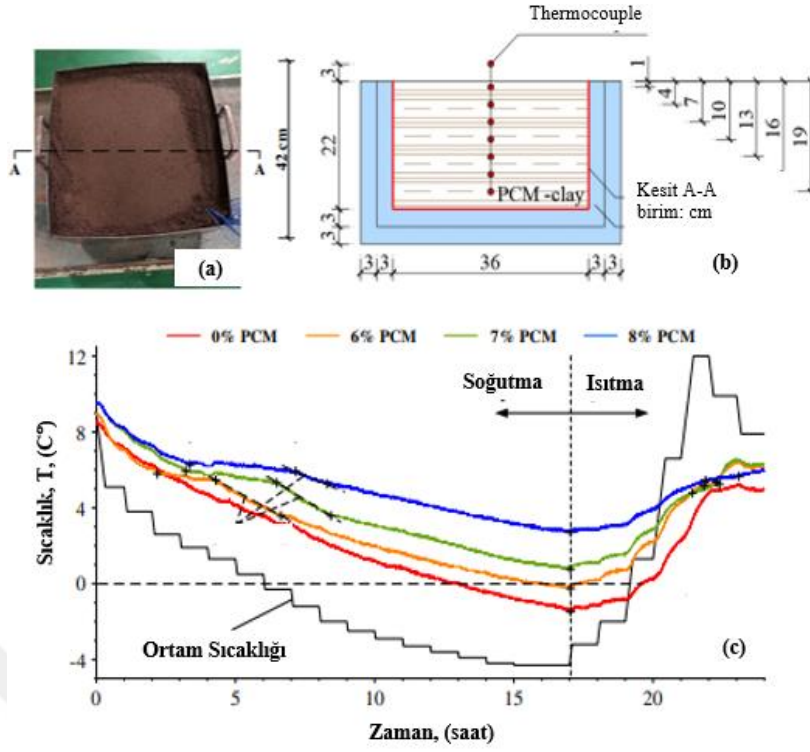
Şekil 1.35 Atterberg limitlerine FDM (PCM) etkisi (Liu vd. (2021))

Liu vd. (2021), hazırlamış oldukları karışımlar üzerinde permeabilite deneyleri gerçekleştirmiş, her bir katkı oranı için elde ettikleri permeabilite katsayısı (k) değerlerini Şekil 1.36'daki gibi sunmuşlardır.



Şekil 1.36 k-PCM ilişkisi (Liu vd. (2021))

Liu vd. (2021), laboratuvarında hazırlamış olduğu büyük ölçekli deney numunesi üzerinde sıcaklık ölçümleri yapmıştır (Şekil 1.37a). Deney numunesinin farklı derinliklerinde yapmış oldukları sıcaklık ölçümleri ile, ortam sıcaklığının deney numunesine olan etkisini incelemiştir (Şekil 1.37b). Mahedi vd. (2019), Rao vd. (2021)'de de olduğu gibi dış ortam sıcaklığının manual/otomatik olarak ölçülüyor olması durumunda dahi numunelerin hedeflenen donma çözülme sıcaklık değerlerine ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 1.37c).

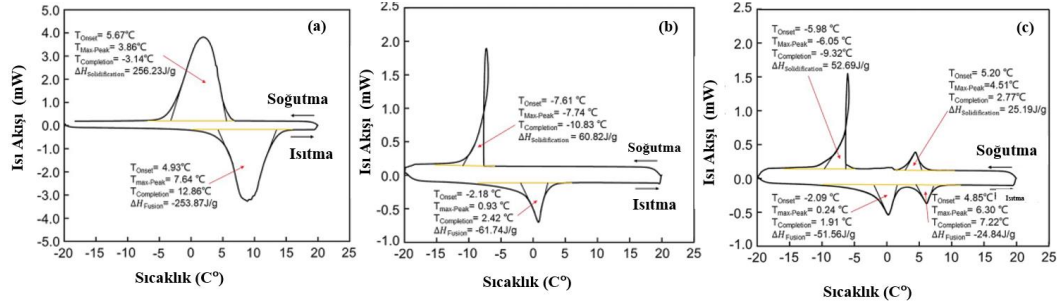


Şekil 1.37 Sıcaklık ölçümleri (Liu vd. (2021))

Chen vd. (2022), 2021 yılında yapmış oldukları çalışmaları sonunda %8 mFDM katkı oranının çalışmalarda en iyi performans gösteren oran olduğunu ve mFDM'nin çalışmalarda kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada ise, 2021 yılı verilerini baz alarak likit FDM ve katkı malzemesinin birlikte göstereceği performansı incelemişlerdir.

Bu kapsamda, Chen vd. (2022), Xinjiang'den temin ettikleri %51,90 likit limit, %18,60 plastik limit değerine sahip, yüksek plastisiteli kil (CH) üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı likit FDM ve katkı malzemesi kullanarak iyileştirebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, renksiz, çekirdek malzemesi parafin olan ve oda sıcaklığında likit halde bulunan kapsülsüz FDM (pPCM) kullanmışlardır. İlave katkı malzemesi olarak C sınıfı uçucu kül tercih etmişlerdir. FDM, zemine kuru ağırlığının %5, %8 ve %10'u kadar, C sınıfı uçucu kül, zemine kuru ağırlığının %8'i kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

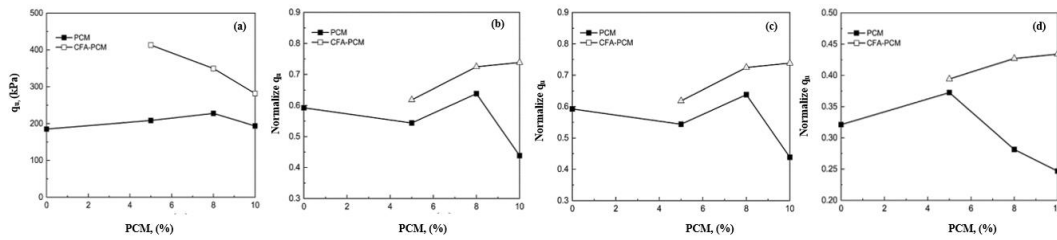
FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir (Şekil 1.38). DSC analizlerini, katkısız ve %10 FDM katkılı zemin karışımı üzerinde gerçekleştirmişlerdir.



a) parafin, b) katkısız zemin, c) %10 FDM katkılı zemin

Şekil 1.38 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2022))

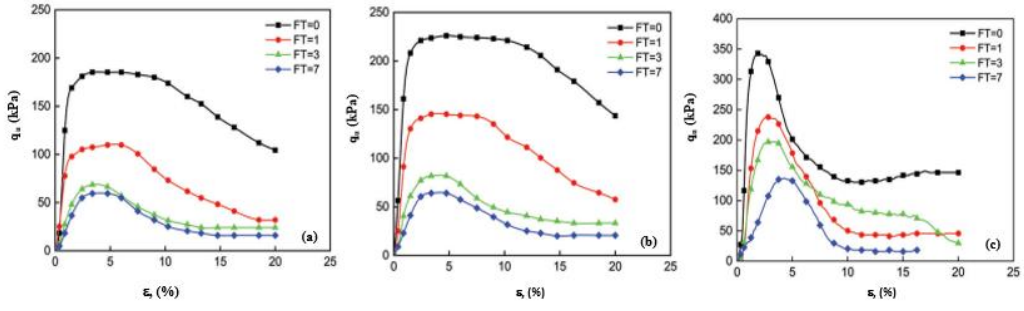
Chen vd. (2022), kompaksiyon parametrelerini (γ_{kmax} , w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, -20 C°'de 12 saat, +20 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 7 olmak üzere 4 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri verileri ise FDM (PCM) oranına bağlı olarak her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.39a, Şekil 1.39b, Şekil 1.39c ve Şekil 1.39d'deki gibi sunmuşlardır.



a) 0 çevrim, b) 1 çevrim, c) 3 çevrim, d) 7 çevrim

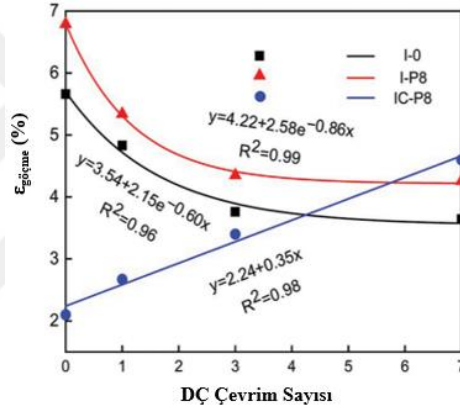
Şekil 1.39 q_u -PCM ilişkisi (Chen vd. (2022))

Chen vd., (2022), deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini ise her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.40a, Şekil 1.40b ve Şekil 1.40c'deki gibi sunmuşlardır.



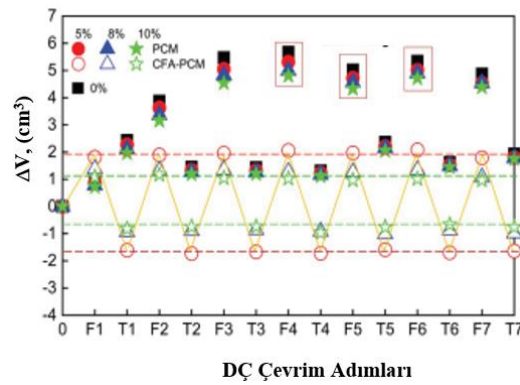
a) %0 katkı, b) %8 FDM katkı, c) %8 FDM katkı ve C uçucu kül
Şekil 1.40 q_u - ϵ ilişkisi (Chen vd. (2022))

Chen vd. (2022), yapmış oldukları serbest basınç deneylerinde elde edilen göçme şekil değiştirme ($\epsilon_{göçme}$) değerlerini donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak incelemiş, ilişkileri Şekil 1.41'deki gibi sunmuştur.



Şekil 1.41 $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2022))

Chen vd. (2022), ayrıca, serbest basınç deneylerinde kullandıkları tüm deney numuneleri için hesap ettikleri hacim değişimlerini donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak Şekil 1.42'deki gibi sunmuştur.

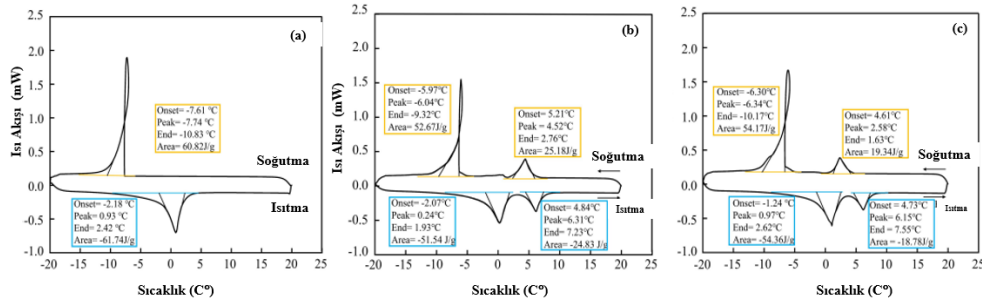


Şekil 1.42 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2022))

Chen vd. (2023), 2021 ve 2022 yıllarında yaptıkları çalışmalarında akabinde, Xinjiang'den temin ettikleri benzer zemin özellikleri gösteren ve %53,10 likit limit, %17,90 plastik limit değerine sahip, yüksek plastisiteli kil (CH) üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı kapsüllü ve kapsülsüz FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır.

Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, beyaz renkli, çekirdek malzemesi parafin olan ve polimerik bir kabuk ile kapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) ile oda sıcaklığında likit halde bulunan kapsülsüz FDM (pPCM) kullanmışlardır. FDM üzerinde yaptıkları analizler sonunda kapsüllü FDM'nin parçacık boyutunun 8-12 μm olduğunu tespit etmişlerdir. mFDM ve pFDM, zemine kuru ağırlığının %5, %8 ve %10'u kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Çalışmalarında ilave bir katkı malzemesi kullanmamışlardır.

FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir (Şekil 1.43). DSC analizlerini, katkısız ve %10 mFDM (kapsüllü ve kapsülsüz) katkılı zemin karışımı üzerinde gerçekleştirmişlerdir.

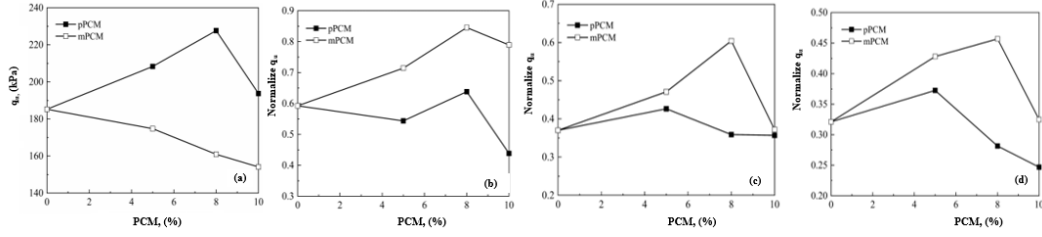


a) Katkısız zemin, b) %10 pPCM katkılı zemin, c) %10 mPCM katkılı zemin

Şekil 1.43 DSC analiz sonuçları (Chen vd. (2023))

Chen vd. (2023), kompaksiyon parametrelerini (γ_{kmax} , w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, -20 C°'de 12 saat, +20 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 7 olmak üzere 4 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri verileri ise FDM (PCM) oranına bağlı olarak her bir çevrim için ayrı ayrı

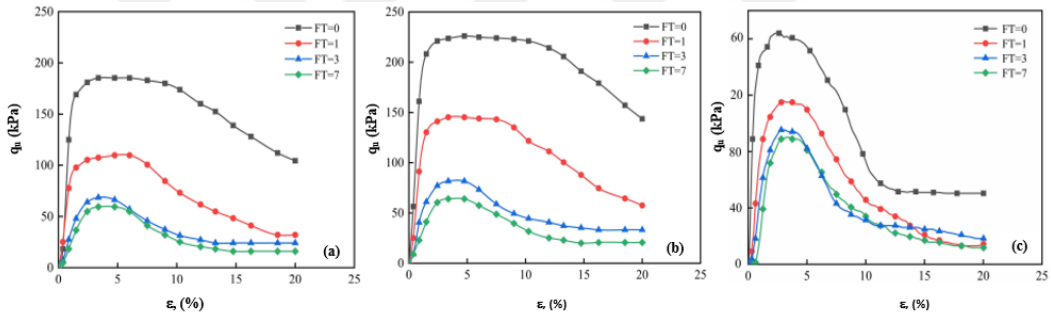
olacak şekilde Şekil 1.44a, Şekil 1.44b, Şekil 1.44c ve Şekil 1.44d'deki gibi sunmuşlardır.



a) 0 çevrim, b) 1 çevrim, c) 3 çevrim, d) 7 çevrim

Şekil 1.44 q_u -PCM ilişkisi (Chen vd. (2023))

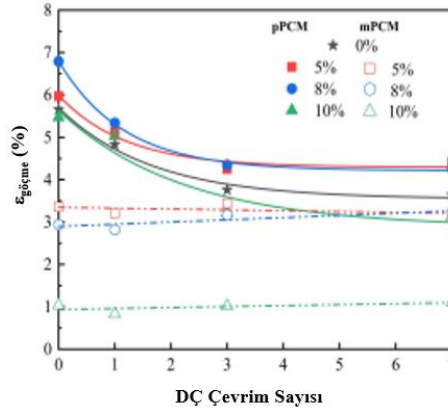
Chen vd., (2023), deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini ise her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 1.45a, Şekil 1.45b ve Şekil 1.45c'deki gibi sunmuşlardır.



a) %0 katkı, b) %8 pPCM katkı, c) %8 mPCM katkı

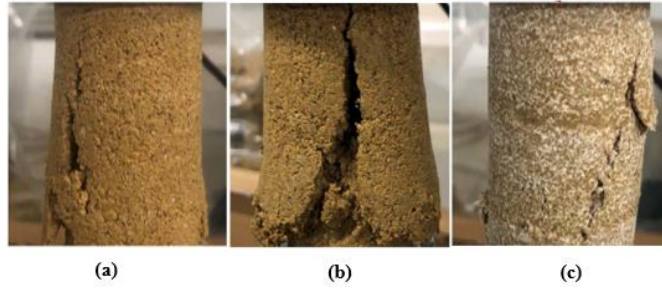
Şekil 1.45 q_u - ϵ ilişkisi (Chen vd. (2023))

Chen vd. (2023), yapmış oldukları serbest basınç deneylerinde elde edilen göçme şekil değiştirme ($\epsilon_{göçme}$) değerlerini donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak incelemiş, ilişkileri Şekil 1.46'daki gibi sunmuştur.



Şekil 1.46 $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2023))

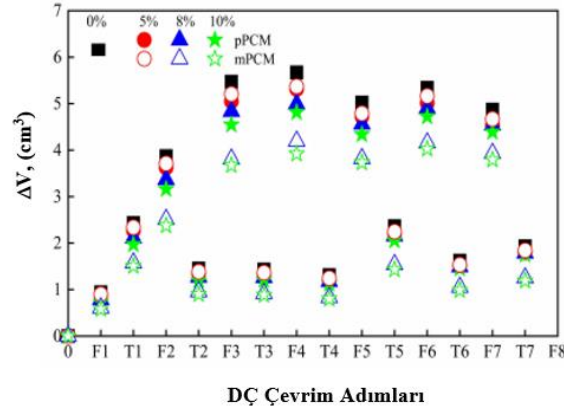
Chen vd. (2023), donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkısız (%0) ve katkılı (%8) zemin üzerinde SEM analizlerini yapmış, donma çözülmenin zemin üzerindeki etkilerini Şekil 1.29'daki gibi önceki çalışmalarında sunmuşlardır. Chen vd. (2023), SEM analizlerinin yanı sıra, %8 katkı oranında hazırlanan her iki formdaki FDM için serbest basınç deneylerinin sonunda deney numunelerinin görüntülerini çekerek FDM'lerin zeminin göçme mekanizması üzerindeki etkilerini görselleştirmiştir (Şekil 1.47).



a) %0 katkılı, **b)** %8 pPCM katkılı, **c)** %10 mPCM katkılı

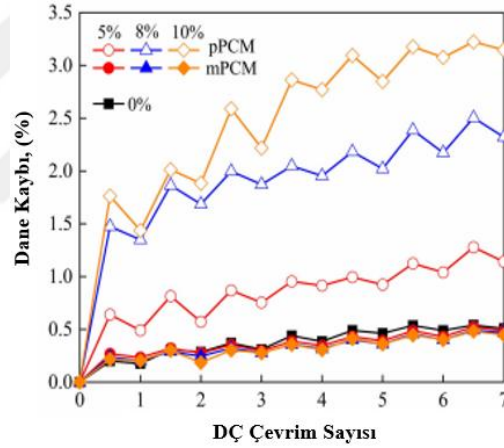
Şekil 1.47 Deney sonrası görseller (Chen vd. (2023))

Chen vd. (2023), ayrıca, serbest basınç deneylerinde kullandıkları tüm deney numunelerinin hacim değişimlerini ölçmüştür. Bu doğrultuda, Şekil 1.31'de verilen Lu vd. (2019)'un önermiş olduğu hacim değişim hesabını dikkate almıştır. Chen vd., (2023), elde ettikleri hacim değişimlerini Şekil 1.48'deki gibi sunmuştur.



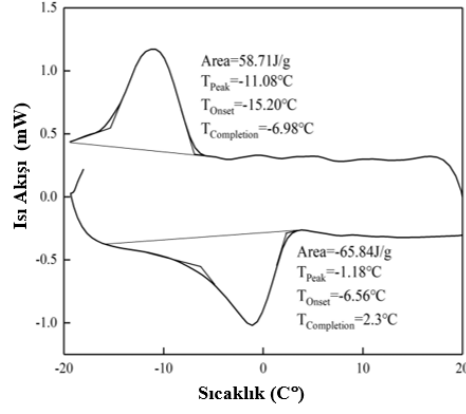
Şekil 1.48 ΔV -DÇ çevrim donma ilişkisi (Chen vd. (2023))

Tüm bunlara ilave olarak Chen vd. (2023), önceki çalışmalarından farklı olarak, deney numunelerinde meydana gelen dane kayıplarını da hesap etmiş, her bir katkı oranı için her bir çevrimde meydana gelen dane kayıplarını Şekil 1.49'daki gibi sunmuşlardır.



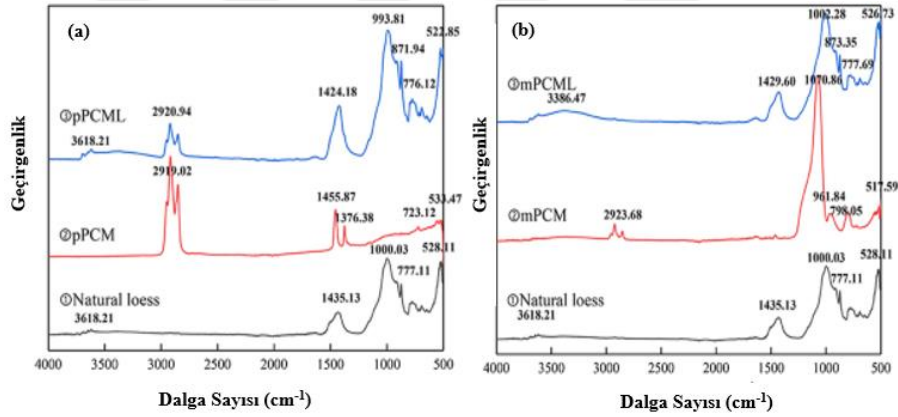
Şekil 1.49 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi (Chen vd. (2023))

Luo vd. (2023), Çin Shanxi-Taiyuan'dan temin ettikleri %27 likit limit, %17 plastik limit değerine sahip olan lös bir zemin üzerinde donma çözülme çevrimlerinin etkilerini incelemek ve oluşan hasarı FDM kullanarak iyileştirebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin ettikleri, çekirdek malzemesi parafin olan ve bir kabuk ile kapsüllü hale getirilen FDM (mPCM) ile oda sıcaklığında likit halde bulunan kapsülsüz FDM (pPCM) kullanmışlardır. FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değişirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir (Şekil 1.50).



Şekil 1.50 DSC analiz sonuçları (Luo vd. (2023))

Luo vd. (2023), kullanmış olduğu FDM üzerinde, organik bileşiklerin kimyasal yapılarını atomların titreşimlerine bağlı olarak belirlemede kullanılan analizlerden biri olan FT-IR analizlerini gerçekleştirmiş, böylece, farklı fonksiyonel gruplara ve kimyasal bağlara sahip atomları belirlemiştir (Şekil 1.51).



a) pPCM, b) mPCM

Şekil 1.51 FT-IR analiz sonuçları (Luo vd. (2023))

İki farklı formda bulunan FDM'nin davranışının incelenmesi sırasında, herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamıştır. mPCM ve pPCM, zemine kuru ağırlığının %5, %8 ve %10'u kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

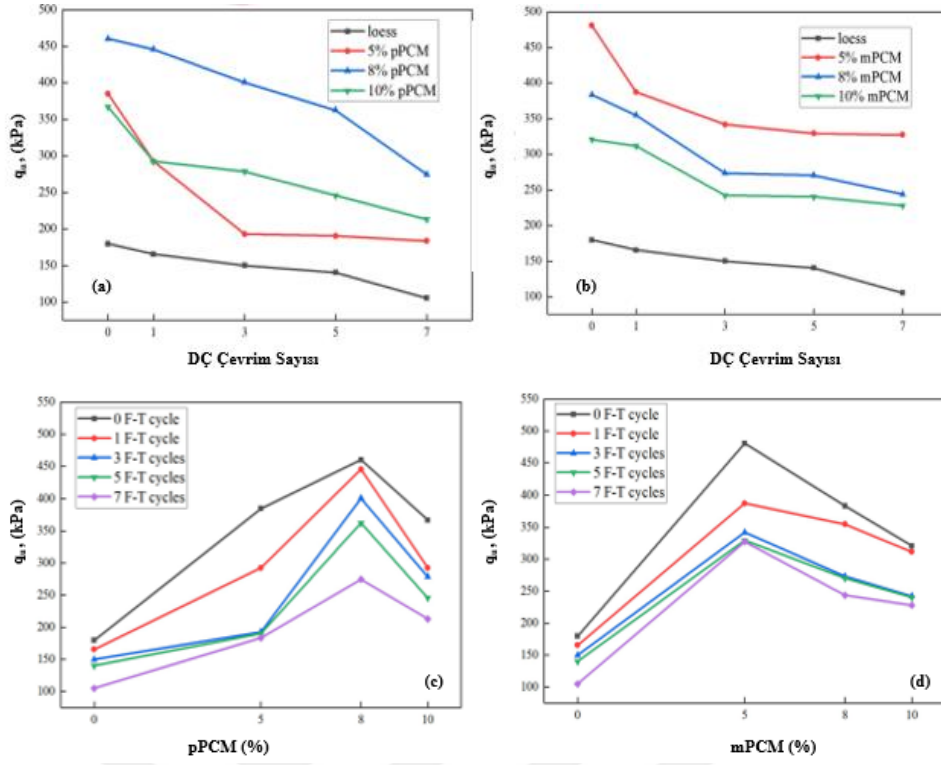
Luo vd. (2023), donma çözülme çevrimleri uygulanmadan önce hazırlamış oldukları karışımlar üzerinde kompaksiyon deneyleri yaparak kapsüllü (mPCM) ve kapsülsüz FDM (pPCM)'in zemin üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Kompaksiyon deneylerinden elde ettikleri bulguları Tablo 1.7'deki gibi sunmuşlardır.

Tablo 1.7 Kompaksiyon sonuçları (Luo vd. (2023))

<i>Karışım Tipi</i>	<i>PCM (%)</i>	γ_k (<i>gr/cm³</i>)	w_{opt} (%)
<i>Lös Zemin</i>	0	1,80	15,18
	5	2,06	12,40
<i>pPCM (%)</i>	8	1,85	9,29
	10	1,85	7,76
	5	1,63	16,45
<i>mPCM (%)</i>	8	1,60	19,06
	10	1,53	21,05

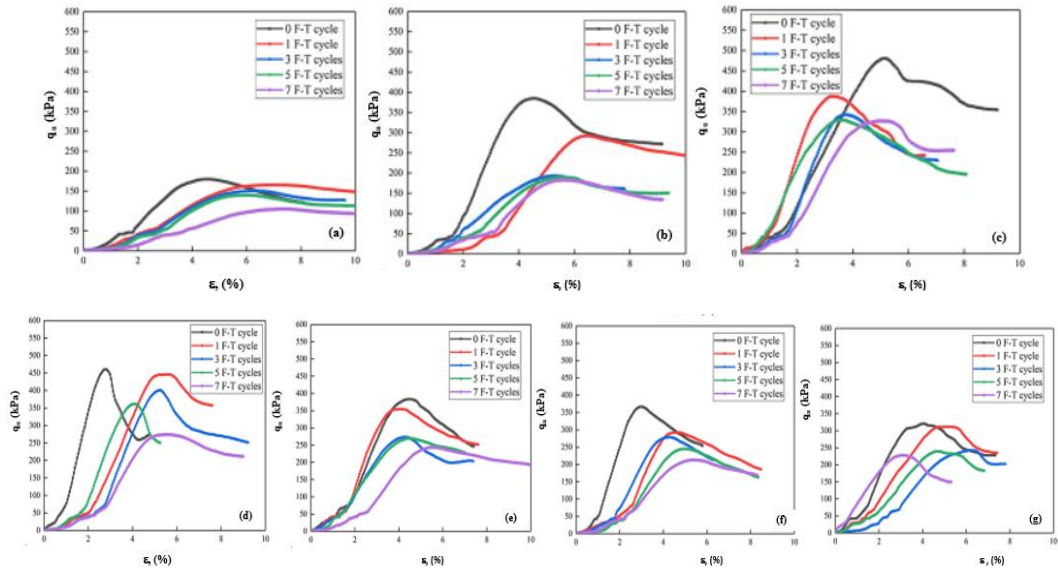
Luo vd. (2023), kompaksiyon parametrelerini (γ_{kmax} , w_{opt}) dikkate alarak optimum su muhtevasında hazırlamış oldukları numuneleri, -15 C°'de 12 saat, +15 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 5, 7 olmak üzere 5 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri verileri FDM (PCM) formu (kapsüllü-kapsülsüz), donma çözülme çevrim sayısı ve katkı oranına göre Şekil 1.52a, Şekil 1.52b, Şekil 1.52c ve Şekil 1.52d'deki gibi sunmuşlardır.



a) q_u -DÇ (pPCM), b) q_u -DÇ (mPCM), c) q_u -pPCM, d) q_u -mPCM

Şekil 1.52 q_u -DÇ-FDM ilişkisi (Luo vd. (2023))

Luo vd. (2023), deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini ise her bir katkı oranı ve FDM (PCM) formunu dikkate alarak Şekil 1.53a-Şekil 1.53g'deki gibi sunmuşlardır.

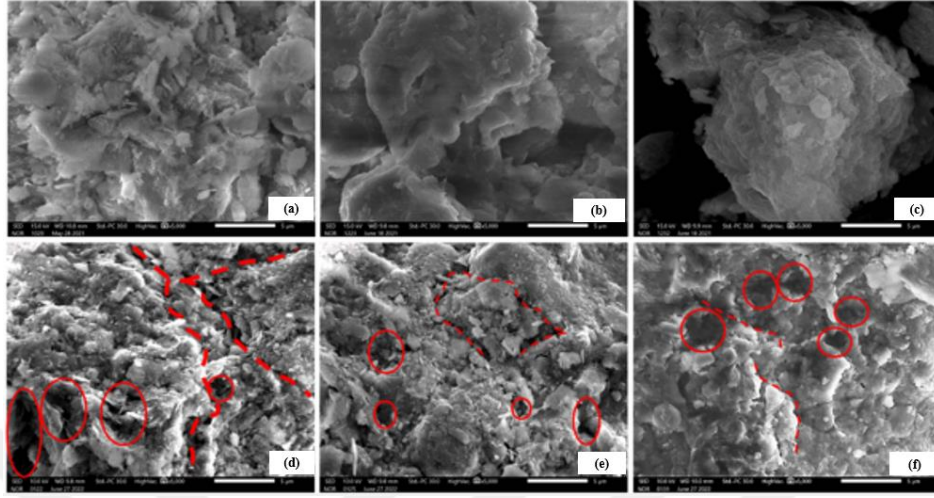


a) %0 katkı b) %5 pPCM, c) %5 mPCM, d) %8 pPCM, e) %8 mPCM,

f) %10 pPCM, g) %10 mPCM

Şekil 1.53 q_u - ϵ ilişkisi (Luo vd. (2023))

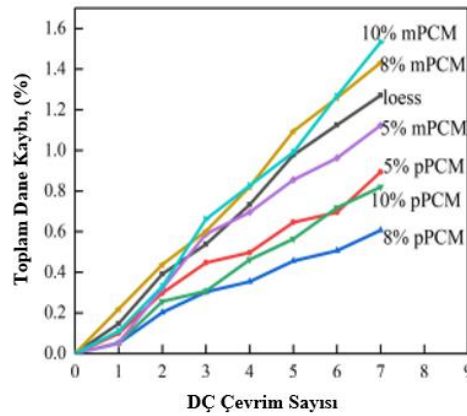
Luo vd. (2023), FDM'lerin donma çözülme çevrimlerinin öncesi ve sonrasındaki morfolojik özelliklerini de SEM analizleri ile incelemiş, Şekil 1.54a-Şekil 1.54f'deki gibi sunmuşlardır.



a) Löss zemin-DÇ öncesi b) %8 pPCM-DÇ öncesi c) %5 mPCM-DÇ öncesi
d) Löss zemin-DÇ sonrası e) %8 pPCM-DÇ sonrası f) %5 mPCM-DÇ sonrası

Şekil 1.54 SEM analiz sonuçları (Luo vd. (2023))

Tüm bunlara ilave olarak Luo vd. (2023), deney numunelerinde meydana gelen dane kayıplarını da hesap etmiş, her bir katkı oranı için her bir çevrimde meydana gelen dane kayıplarını Şekil 1.55'deki gibi sunmuşlardır.



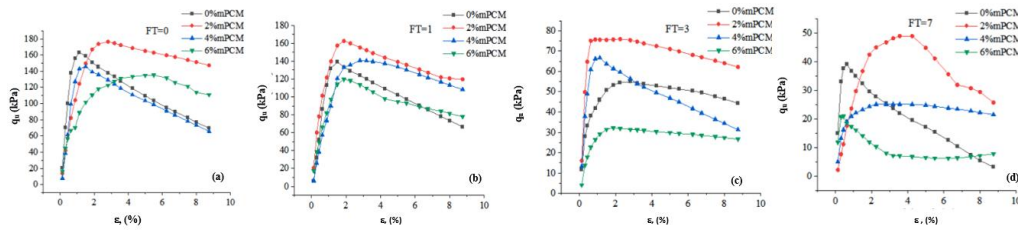
Şekil 1.55 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi (Luo vd. (2023))

Guo vd. (2024), temin ettikleri %25.52 likit limit, %15.64 plastik limit, içeriğine sahip düşük plastisiteli zemin (CL) üzerinde FDM'nin etkilerini inceleyebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, özel bir firmadan temin edilen, tetradekan çekirdek malzemesine sahip, polymethylmethacrylate bir kabuk

ile kapsüllenen mFDM kullanmışlardır. FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC analizi ile FDM'nin faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmiştir.

mFDM, zemine kuru ağırlığının %2, %4 ve %6'ı kadar ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş, %0 katkı oranları için de deney numuneleri hazırlanmış, referans deneyler olarak sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Çalışmalarında herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamıştır.

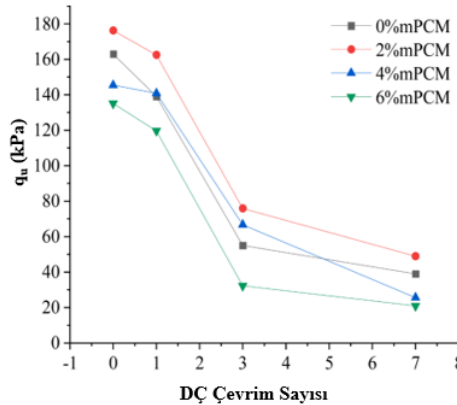
Guo vd. (2024), hazırlamış oldukları karışımları -20 C°'de 12 saat, +20 C°'de 12 saat bekleterek 0, 1, 3, 7 olmak üzere 4 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakmış, ardından serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) verilerini donma çözülme çevrim sayısına Şekil 1.56a-Şekil 1.56d'deki gibi sunmuşlardır.



a) 0 çevrim, b) 1 çevrim, c) 3 çevrim, d) 7 çevrim

Şekil 1.56 q_u - ϵ ilişkisi (Guo vd. (2024))

Guo vd. (2024), Şekil 1.56'da verilen deney verilerini tek bir grafik altında toplayıp serbest basınç mukavemeti (q_u) ile donma çözülme çevrimleri arasındaki ilişkiyi Şekil 1.57'deki gibi sunmuşlardır.



Şekil 1.57 q_u -DÇ çevrim ilişkisi (Guo vd. (2024))

FDM'nin sıcaklık dalgalanmasını azaltma özelliği sayesinde, zeminin donma çözülme çevrimleri sonundaki davranışının iyileştirildiğinin göstergesi olan bu deneysel çalışmalar, 2019 yılında Mahedi vd. tarafından başlatılmış olup, halen devam etmektedir. Çalışmalarda kullanılan zemin sınıfları, varsa ilave katkı malzemeleri, kullanılan FDM'nin formu (kapsüllü/kapsülsüz), FDM'nin zemine ilave edildiği oran, donma çözülme çevrim koşulları (çevrim sayısı, sıcaklık, zaman), yapılan analizler ve başvurulmuş deneysel yöntemler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Aynı zamanda araştırmanın temelini oluşturan ve sonuçlarını etkileyen bu baş faktörler Tablo 1.8'de özetlenmiştir.

Tablo 1.8 Literatür çalışmaları

<i>Kaynak</i>	<i>Zemin Sınıfı</i>	<i>İlave Katkı</i>	<i>FDM formu</i>	<i>FDM Oranı (%)</i>	<i>DÇ Koşulları</i>	<i>Analizler ve Deneyler</i>
Mahedi vd. (2019)	ML	C sınıfı uçucu kül	Kapsüllü ve kapsülsüz parafin	5 8 10	0, 1, 3 -23 C°, 24 sa., +21 C°, 24 sa.	DSC, ATT, kompaksiyon, SB., w ölçümü, sıcaklık ölçümü, (w_{opt})
Kravchenko vd. (2020)	CL	Çimento	Kapsüllü ve kapsülsüz parafin	2 4	-	DSC, SEM, sıcaklık ölçümü
Kravchenko vd. (2021)	-	-	Kapsüllü parafin	-	-	DSC, SEM, XPS
Rao vd. (2021)	CL	-	Kapsüllü parafin ve bütül stearat	4 8 10	0, 1, 3, 5 -20 C°, 12 sa., +20 C°, 12 sa.	DSC, FT-IR, XPS, SEM, SB, sıcaklık ölçümü, (w_{opt})
Chen vd. (2021)	CH	-	Kapsüllü Parafin	5 8 10	0, 1, 3, 7 -20 C°, 12 sa., +20 C°, 12 sa.	DSC, SEM, SB., hacim değişimi, (w_{opt})

Tablo 1.8 Literatür çalışmaları (devamı)

<i>Kaynak</i>	<i>Zemin Sınıfı</i>	<i>İlave Katkı</i>	<i>FDM formu</i>	<i>FDM Oranı (%)</i>	<i>DÇ Koşulları</i>	<i>Analizler ve Deneyler</i>
<i>Liu vd. (2021)</i>	CL	-	Parafin	6 7 8	-	DSC, ATT, kompaksiyon, CD kesme deneyi, permeabilite, sıcaklık ölçümü
<i>Chen vd. (2022)</i>	CH	C sınıfı uçucu kül	Kapsülsüz parafin	5 8 10	0, 1, 3, 7 -20 C°, 12 sa., +20 C°, 12 sa.	DSC, SEM, SB., hacim değişimi, (w _{opt})
<i>Chen vd. (2023)</i>	CH	-	Kapsüllü ve kapsülsüz parafin	5 8 10	0, 1, 3, 7 -20 C°, 12 sa., +20 C°, 12 sa.	DSC, SEM, SB., hacim değişimi, dane kaybı, (w _{opt})
<i>Luo vd. (2023)</i>	Lös	-	Kapsüllü ve kapsülsüz parafin	5 8 10	0, 1, 3, 5, 7 -15 C°, 12 sa., +15 C°, 12 sa.	DSC, SEM, FT-IR, kompaksiyon, SB., dinamik üç eksenli, dane kaybı, (w _{opt})
<i>Guo vd. (2024)</i>	CL	-	Tetradekan mFDM	2 4 6	0, 1, 3, 7 -20 C°, 12 sa., +20 C°, 12 sa.	DSC, SB. (w _{opt})
<i>DÇ Koşulları: Çevrim Sayısı, Sıcaklık (C°), Zaman, (saat)</i>						
<i>Kapsüllü ve kapsülsüz ifadeleri: mikrokapsülü temsil etmektedir.</i>						

Tablo 1.8’de de özetlendiği üzere, CL, CH ve ML zemin sınıfındaki zeminlerin donma çözülme davranışı parafın bazlı kapsüllü/kapsülsüz FDM kullanılarak incelenmiştir. -20 C°’de 12 sa., +20 C°’de 12 sa. olarak uygulanan donma çözülme çevrimleri sonunda yapılan serbest basınç deneyleri ile mukavemet davranışları incelenmiştir.

FDM’nin seçiminde en önemli nokta, FDM’nin çalışma sıcaklık aralığı içerisinde faz değiştirebilmesidir. FDM’nin çalışma şartlarına uygunluğunun yani faz değiştirme sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen DSC analizlerinin uygulanma koşulları Tablo 1.8’de bahsi geçen literatür çalışmaları için detaylı bir şekilde Tablo 1.9’da, DSC analiz sonuçları ise Tablo 1.10’da sunulmuştur.

Tablo 1.9 DSC analizleri uygulanma koşulları

<i>Deney Koşulları</i>	<i>Mahedi vd. (2019)</i>	<i>Kravchenko vd. (2020), (2021)</i>	<i>Rao vd. (2021)</i>	<i>Chen vd. (2021), (2022), (2023)</i>	<i>Luo vd. (2023)</i>	<i>Liu vd. (2021)</i>	<i>Guo vd. (2024)</i>
<i>Başlangıç sıcaklık değeri, (C°)</i>	-15	-25	-25	-20	-20	-15	-20
<i>Nihai sıcaklık değeri, (C°)</i>	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20
<i>Başlangıç ve nihai sıcaklıklarda bekleme süresi, (dk)</i>	1	-	5	2	2	-	-
<i>Tarama hızı, (C°/dk)</i>	5	1 ve 5	1 ve 5	5	5	2	-

1.2.3 “FDM’nin Termal Özelliklerinin Belirlenmesi” başlığında da bahsedildiği üzere DSC analizi için başlangıç sıcaklığı, işlem yapılacak ortamın sınır sıcaklık değerleri dikkate alınarak belirlenmektedir. DSC analizlerinde ısıtma hızı, numuneyi belli bir sıcaklıkta tutma süresi ve tarama hızı değişken parametrelerdir. Tablo 1.9’da özetlenen DSC analizlerinin uygulanma koşullarında, çalışmalar hangi donma çözülme çevrim sınır sıcaklık değerlerinde yapıldı ise o sıcaklık değerleri arasında DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. Genel olarak 5 C°/dk tarama hızı tercih edilmiş olup, donma çözülme çevrim sınır sıcaklık değerleri için çalışmalar -20 C° ve +20 C° arasında yapılmıştır.

Tablo 1.10 DSC analiz sonuçları (özet)

<i>Faz Değişimi</i>	<i>Özellik</i>	<i>Mahedi vd. (2019)</i>	<i>Kravckenko vd. (2020), (2021) (1 C %dk)</i>		<i>Kravckenko vd. (2020), (2021) (5 C %dk)</i>	
			<i>mPCM</i>	<i>pPCM</i>	<i>mPCM</i>	<i>pPCM</i>
<i>Katı Fazdan Sıvı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	-6.62 ile 10.33	1.8 ile 5.1	3.1 ile 6.3	0.3 ile 8.2	3.2 ile 10.4
	Tepe Sıcaklık, (C°)	5.78	4.2	5.6	5.8	8.3
	Erime Isısı (mJ)	604.522	-	-	-	-
	Entalpi (J/g)	166.995	187.2	193.8	182.7	200.3
<i>Sıvı Fazdan Katı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	0.12 ile -13.72	-7.5 ile -5.9	-2.7 ile -1.1	-9.8 ile -4.8	-6.1 ile -0.3
	Tepe Sıcaklık, (C°)	-2.76	-6.9	-1.5	-7.7	-3.9
	Erime Isısı (mJ)	599.224	-	-	-	-
	Entalpi (J/g)	-165.532	-181.7	-192.7	-177.6	-198
<i>Faz Değişimi</i>	<i>Özellik</i>		<i>Rao vd. (2021), (1 C %dk)</i>		<i>Rao vd. (2021), (5 C %dk)</i>	
			<i>B-PCM</i>	<i>P-PCM</i>	<i>B-PCM</i>	<i>P-PCM</i>
<i>Katı Fazdan Sıvı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)		3.1 ile 6.3	1.8 ile 5.1	3.2 ile 10.4	0.3 ile 8.2
	Tepe Sıcaklık, (C°)		5.6	4.2	8.3	5.8
	Erime Isısı (mJ)		-	-	-	-
	Entalpi (J/g)		193.8	187.2	200.3	182.7
<i>Sıvı Fazdan Katı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)		-2.7 ile-1.1	-7.5 ile-5.9	-0.3 ile-6.1	-7.8 ile-12.4
	Tepe Sıcaklık, (C°)		-2	-6.9	-3.9	-10.9
	Erime Isısı (mJ)		-	-	-	-
	Entalpi (J/g)		-192.7	-181.7	-198	-177.6

Tablo 1.10 DSC analiz sonuçları (özet) (devamı)

<i>Faz Değişimi</i>	<i>Özellik</i>	<i>Chen vd. (2022)</i>	<i>Chen vd. (2021), (2023)</i>		<i>Chen vd. (2021), (2023)</i>	
			<i>%10 mPCM</i>		<i>%10 pPCM</i>	
<i>Katı Fazdan Sıvı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	4.93 ile 12.86	4.61 ile 1.63	-6.30 ile -10.71	5.21 ile 2.76	-5.97 ile -9.32
	Tepe Sıcaklık, (C°)	7.64	2.58	-6.34	4.52	-6.04
	Erime Isısı (mJ)	-	-	-	-	-
	Entalpi (J/g)	253.87	19.34	54.17	25.18	52.67
<i>Sıvı Fazdan Katı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	5.67 ile 3.14	4.73 ile 7.55	-1.24 ile 2.62	4.84 ile 7.23	-2.07 ile 1.93
	Tepe Sıcaklık, (C°)	3.86	6.15	0.97	6.31	0.24
	Erime Isısı (mJ)	-	-	-	-	-
	Entalpi (J/g)	256.23	18.78	54.36	-24.83	-51.54
<i>Faz Değişimi</i>	<i>Özellik</i>	<i>Luo vd. (2023)</i>	<i>Liu vd. (2021)</i>	<i>Guo vd. (2024)</i>		
<i>Katı Fazdan Sıvı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	-15.20 ile -6.98	-0.4 ile 8.47	3.1 ile 6.6		
	Tepe Sıcaklık, (C°)	-11.08	5.04	12.3		
	Erime Isısı (mJ)	-	-	-		
	Entalpi (J/g)	58.71	175.3	93.58		
<i>Sıvı Fazdan Katı Faza Geçiş</i>	Sıcaklık Aralığı, (C°)	-6.56 ile 2.3	2.02 ile -3.55	-18.6 ile -5.7		
	Tepe Sıcaklık, (C°)	-1.18	2.14	-11.6		
	Erime Isısı (mJ)	-	-	-		
	Entalpi (J/g)	-65.84	179.9	-91.74		

Tablo 1.8’de sunulduğu üzere tüm çalışmalarda organik bazlı FDM olan parafin tercih edilmiştir. Gerek kapsülsüz (likit) gerek kapsüllü haldeki FDM’ler üzerinde gerçekleştirilen DSC analiz sonuçları detaylı bir şekilde Tablo 1.10’da özetlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan FDM türü aynı olmasına rağmen faz değiştirme sıcaklık aralıklarının ve entalpi değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu noktada, tüm parafin bazlı bileşiklerin farklı kimyasal yapıya sahip oldukları göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez çalışmasında literatürdeki eksiklerin tamamlanabilmesi amacıyla, zemin sınıfı, FDM katkı oranı, FDM formu, donma çözülme çevrim sayısı, yapılan analiz ve deneyler için Tablo 1.8’de özetlenen literatür çalışmaları göz önünde bulundurularak seçimler yapılmıştır. 2019-2024 yılları arasında yapılan deneysel çalışmalarda çoğunlukla CH, CL ve ML zemin kullanılmıştır. FDM türü olarak Şekil 1.2’de sunulan FDM sınıflarından organik bazlı FDM (OFDM) olan parafin tercih edilmiştir. OFDM, zemine %2, %4, %5, %6, %7, %8 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Donma çözülme çevrimi 0, 1, 3, 5 ve 7 kez olacak şekilde uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda çoğunlukla mukavemet davranışı incelenmiş, bu kapsamda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, Tablo 1.8’de belirtilen çalışmalardan zemin türü, donma çözülme çevrim sayısı, mFDM katkı oranı, yapılan deneyler bakımından literatürdeki çalışmalardan farklılaşmaktadır.

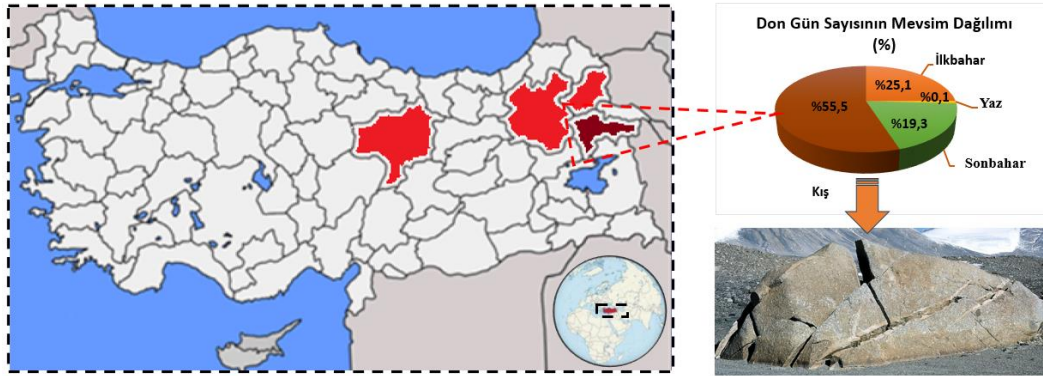
Bu tez çalışmasında, MH zemin dikkate alınmıştır. Böylece bu tez çalışmasında elde edilen bulgular, literatürde MH zemin davranışının belirlenebilmesi açısından var olan boşluğu doldurmaktadır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışmasında kullanılan MH zemin homojen bir zemin olup, ticari olarak bir firmadan temin edilmiştir. Böylelikle, tüm deneyler homojen zemin üzerinde gerçekleştirilmiş olup, zemin mineralojisinin etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. FDM türü olarak, en avantajlı konuma sahip olan OFDM tercih edilmiştir. OFDM’nin zemine ilave edildiği oranlar deneme deneyleri ile %5, %8, %10, %12 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan homojen karışımlar üzerinde uygulanan donma çözülme çevrimleri için 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 tercih edilmiş, böylece literatürde yer alan çalışmalara göre daha geniş sürelerdeki davranış da incelenmiştir. Hazırlanan karışımların sadece mukavemet davranışı değil, sıkışabilirlik ve hidrolik iletkenlik davranışı da incelenmiştir. Bu kapsamda bu

Çalışma, zeminin mukavemet davranışının incelendiği serbest basınc, zeminin sıkışabilirlik davranışının incelendiği tek boyutlu odometre, zeminin hidrolik iletkenlik davranışının da incelendiği dışen seviyeli permeabilite deneylerini içermektedir. Bu bakımdan da, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin performansının incelenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Sonuç olarak, bu doktora tez çalışması, özellikle yüksek plastisiteli killi silt (MH) bir zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması durumunda davranışının incelenmesi ve mFDM ile iyileştirilmesi açısından literatürdeki boşluğa karşılık gelmektedir.



2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminler en soğuk iller olan Ardahan, Kars, Ağrı, Erzurum ve Sivas'ın yer aldığı İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır (Şekil 2.1). Bu şehirler esas olarak dağlık alanlardır. Bu şehirlerde karayolları, yüzölçümünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır. 1940-2023 yılları arasında mevcut olan istatistik veriler doğrultusunda, en soğuk il Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Ağrı'dır. Ağrı ilinin ortalama rakımı 1630 m, en düşük hava sıcaklığı $-43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, en yüksek hava sıcaklığı $39,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, en yüksek kar kalınlığı ise 225 cm olarak ölçülmüştür (mgm, 2023).



Şekil 2.1 Türkiye iklim durumu (Karabulut (2018))

Sıcaklığın $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yaklaştığı ve $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğü günler “don günleri” olarak ifade edilmektedir. 1960-2012 yılları arasında yapılan araştırmalara göre, Ağrı'da ortalama don gün sayısı, yılda 156,1 gündür. Don günlerinin mevsimlere göre dağılımını gösteren Şekil 2.1 incelendiğinde, don olayının en fazla görüldüğü kış mevsiminde, ortalama 86,7 gün don olayı meydana gelmekte ve bunun toplama oranı % 55,5'i aşmaktadır. İlkbahar mevsiminde % 25,1 oranında don meydana gelirken, sonbahar mevsiminde bu oran % 19,3'e inmektedir. Yaz mevsiminde ise don olayı görülmemektedir denilebilir (Karabulut, 2018; mgm, 2023).

%55,5 oranındaki don günlerinin ardından ilkbahar mevsiminin başlaması ile karlar erimekte ve eriyen yüzeylerde çok fazla toprak kaybı meydana gelmektedir (Karabulut, 2018). Wischmeier ve Smith (1978), hala donmuş katmanlar üzerindeki erimiş yüzey katmanlarının büyük erozyon potansiyeline sahip olduğunu belirterek,

bu katmanların, kar erimesi veya düşük yoğunluklu yağış nedeniyle büyük miktarlarda yüzey akışı ve tortu üretebileceğini vurgulamışlardır. Edwards ve Burney (1994) de toprağın 10 gün boyunca sürekli olarak dondurulduğu durumlarda, aynı dönemdeki günlük donma çözülme çevrimlerine kıyasla %178 daha fazla tortu kaybı ve %160 daha fazla yüzey akışı olduğunu belirtmiştir.

Sonuç olarak, kış mevsiminde don gün sayısının bu kadar yüksek olması, yaz mevsiminde ise tamamen sıfırlanmasının, zeminin aşınabilirliği üzerinde büyük etkisi vardır. Bu durum ve bu durumun tekrarı, morfolojik açıdan zeminin donma çözülmeyle ortaya çıkan fiziksel parçalanmasının büyüklüğünü belirlemektedir.

Özellikle yüksek plastisiteli zeminlerde (CH ve MH) dış ortam sıcaklığındaki değişiklikler ve çevresel faktörler (su alma ve su kaybetme) zemin yapısında tahribat meydana getirmektedir. Suya maruz kaldıklarında şişmeleri, kuruduklarında ise büzülmeleri ile yüksek hacim değişimi meydana gelmektedir (Gencdal vd., 2020). Bu tür zeminlerin şişmesi ve büzülmesi, zeminin mukavemetinde azalmaya, oturmasında ve hidrolik iletkenliğinde artışa neden olmakta, sonuç olarak bu zeminlerin iyileştirilerek eski performansını sergilemesi de oldukça zorlaşmaktadır. Bu durum mühendislik yapıları için tehlike arz etmektedir (Chaduvula vd., 2017; Ferber vd., 2009). Tüm bu problemlere ilave olarak, bu tip zeminlerin toprak dolgu inşasında kullanılması durumunda, donma çözülme çevrimlerine maruz kalmaları dikkate alınarak hacim değişimi (şişme veya oturma) davranışları ayrıntılı olarak incelenmeli ve tasarımda bu bilgilerden yararlanılmalıdır (Chaduvula vd., 2017). Ayrıca, soğuk bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli zeminler mühendislik uygulamalarında iyileştirilmeden kullanılmamalıdır (Viswanadham vd., 2009; Murty ve Krishna 2006; Qi ve Ma, 2010).

2.1. Zemin

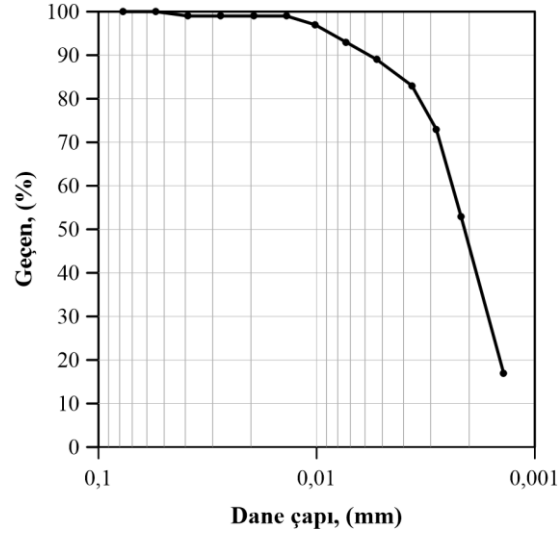
Bu tez çalışması kapsamında, Kocaeli mevkiinden tedarik edilen Ukrayna menşeli yüksek plastisiteli, donmaya karşı duyarlı, beyaz renkli killi silt bir zemin numunesi kullanılmıştır (Şekil 2.2). Deneysel çalışmada kullanılan zemin üzerinde elek ve hidrometre analizi (ASTM D6913 ve ASTM D7928), Atterberg limitleri (ASTM D4318), standart ve modifiye kompaksiyon (ASTM D1557) deneyleri yapılarak zemin sınıfı belirlenmiştir. Tablo 2.1’de özetlenen deney sonuçları ile zemin sınıfının, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)’ne göre yüksek plastisiteli killi silt (MH) olduğu tespit edilmiştir. Zemine ait dane çapı dağılım eğrisi Şekil 2.3’te, her iki kompaksiyon enerji seviyesi ile belirlenen optimum su muhtevası (w_{opt}) ve kuru yoğunluk (ρ_k) ilişkisi Şekil 2.4’te sunulmuştur.



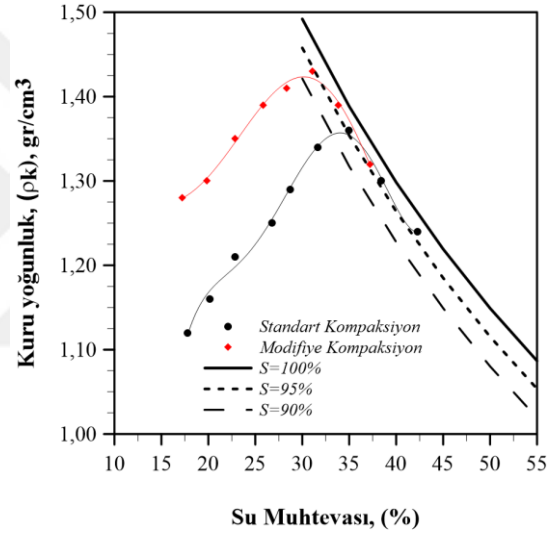
Şekil 2.2 Çalışma kapsamında kullanılan zemin

Tablo 2.1 Çalışma kapsamında kullanılan zemin özellikleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Silt Oranı, (%)</i>	55,00	<i>$\rho_{kmax-stndrt}$, (gr/cm³)</i>	1,36
<i>Kil Oranı, (%)</i>	45,00	<i>$w_{opt-stndrt}$, (%)</i>	34,80
<i>Özgül Ağırlık, (G_s)</i>	2,65	<i>$\rho_{kmax-modifiye}$, (gr/cm³)</i>	1,41
<i>Likit Limit, w_L, (%)</i>	54,00	<i>$w_{opt-modifiye}$, (%)</i>	31,00
<i>Plastik Limit, w_p, (%)</i>	37,19		

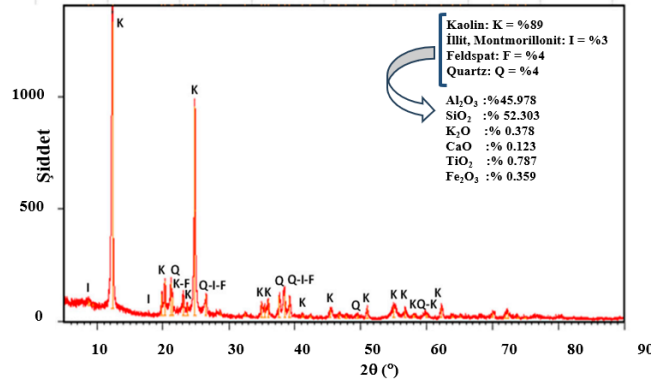


Şekil 2.3 Zemine ait dane çapı dağılım eğrisi



Şekil 2.4 Zemine ait kompaksiyon eğrileri

Zeminin mineralojik tayininin belirlenebilmesi için, kuru toz numune (<0.075 mm) üzerinde Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda XRD (X-Işını Difraktometresi) ve XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi) analizleri yaptırılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 XRD ve XRF analiz sonuçları

Şekil 2.5'te sunulan ve MH zemin üzerinde yapılan XRD ve XRF analizleri sonucunda zemin içerisinde kaolin (%89), kuvars (%4), feldspat (%4) ve illit-montmorillonit (%3) mineralleri görülmüştür.

Zeminlerin donma çözülme davranışında, dane çapı dağılımı ve minerolojisi büyük önem arz etmektedir (Casagrande, 1932 ve Beskow, 1935). Chamberlain (1981) tarafından zemin sınıfı ile don hassasiyet derecesi ilişkisi Tablo 2.2'de sunulmuştur.

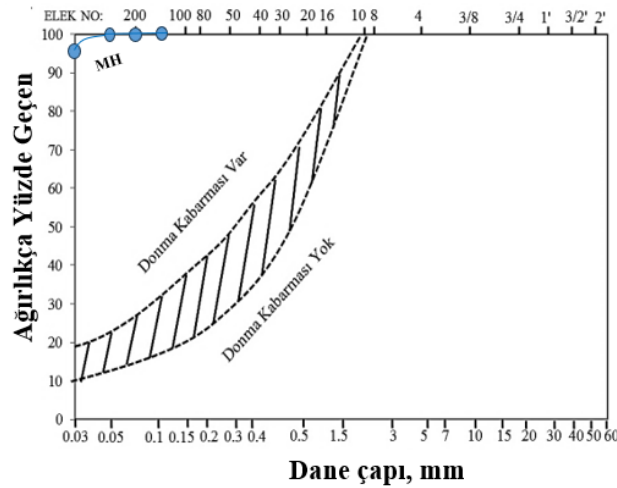
Tablo 2.2 Zeminlerin don hassasiyeti (Chamberlain, (1981))

<i>Don Hassasiyeti</i>	<i>Zemin Sınıfı</i>	<i>Zemin Sınıfı (USCS)</i>
Yok	Temiz Çakıl	GW, GP
	Temiz Kum	SW, SP
Hafif	Siltli, killi çakıl	GM, GC
Orta	Siltli, killi kum	SM, SC
	Yüksek plastisiteli kil	CH
	Organik kil	OH
Yüksek	Düşük / yüksek plastisiteli silt,	ML, MH
	Düşük plastisiteli kil,	CL
	organik silt	OL

Tablo 2.2'de de görüldüğü üzere, USCS'ye göre zemin sınıfı MH olan zeminler, don hassasiyeti yüksek olan zemin sınıfı kategorisindedir.

Bununla birlikte, donma çözülme çevrimlerinin etki mertebesi birçok faktörden etkilenmektedir (Brandl, 2008). Bu faktörler başta zemin dane çapı dağılımı ve ince dane oranı, ince daneli zeminlerin minerolojik özelliği, ortamdaki su varlığı, su muhtevası, permeabilitesi, iklim şartları ve sıcaklık, zaman, sürşarj yükü ve zemin sıkılığı olarak sıralanabilir. Beskow (1935) tarafından yapılan çalışmada, dane çapı

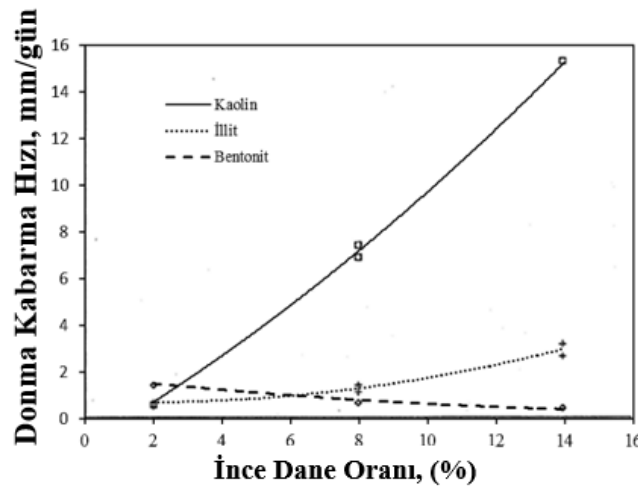
dağılımı ile don hassasiyeti arasındaki ilişki Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Zemin dane çapı dağılımı-don hassasiyeti ilişkisi (Beskow (1935))

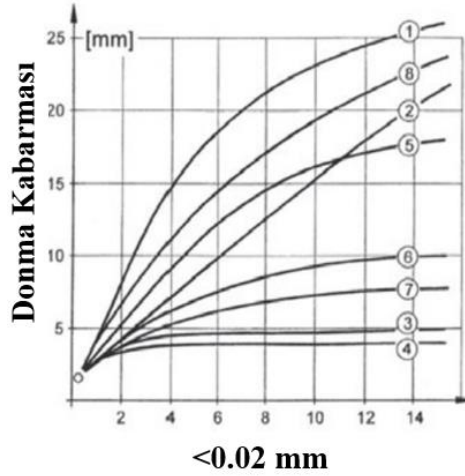
Bu çalışmada kullanılan MH zemin, %100 ince daneli zemindir ve MH zeminin, Şekil 2.6’daki konumu mavi ile gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılan yüksek don hassasiyeti olan MH zemin üzerinde XRD analizi yaptırılmıştır (Şekil 2.5). XRD analiz verilerinden zeminin yüksek oranda (%89) kaolin içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüksek kaolin içeriğine sahip siltli killi zeminlerin donmaya karşı oldukça duyarlı olduğu bilinmektedir (Işık, 2014). Tester ve Gaskin (1996), zemindeki ince dane oranının artmasıyla sırasıyla kaolin, illit ve bentonit grubu karışımlarında zeminin don kabarma hızının arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 İnce dane oranı-donma kabarma hızı (Tester ve Gaskin (1992))

Brandl (2008)'de, donma kabarma oranlarının sadece ince dane oranına değil aynı zamanda ince daneli zeminin mineralojisine de bağlı olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Mineral türü-donma kabarması ilişkisi (Brandl (2008))

Şekil 2.8'de, 1. eğri kaolin, 2. eğri illit, 3. eğri montmorillonit, 4. eğri quartz, 5. eğri dolomit, 6. eğri kalsit, 7. eğri klorit, 8. eğri ise mika mineralini temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan kaolin, don kabarması en yüksek mertebede olan mineral sınıfındadır. Brandl (2008), yapmış olduğu çalışmada kaolen grubu ince daneli zeminlerde, ince dane oranının artması ile donma kabarma hızlarının illit ve bentonit grubu ince daneli zeminlere göre daha fazla olduğunu ve kaolen grubunun donma olayından daha fazla etkileneceğini belirtmiştir.

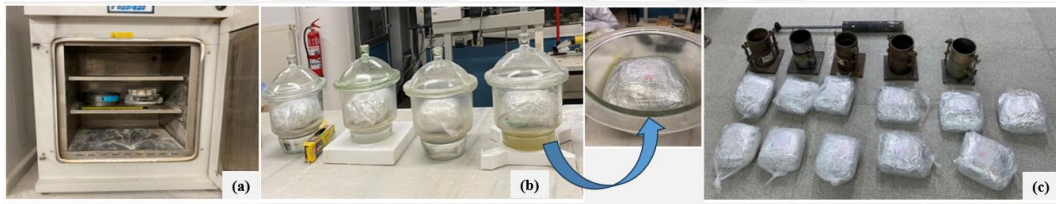
Tablo 2.2, Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de sunulan literatür bulguları ile Tablo 2.1, Şekil 2.3 ve Şekil 2.5'te sunulan deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada kullanılan MH zemin hem zemin sınıfı bakımından hem ince dane oranı bakımından hem de zemin mineralojisi bakımından yüksek don hassasiyeti göstermektedir. Donma çözülmenin zeminin mekanik davranışı üzerindeki olumsuz etkilerinin incelenmesi ve elde edilen sonuçların FDM kullanılarak iyileştirilmesi kapsamında yapılan bu tez çalışmasında tercih edilen bu zemin, donma hassasiyeti bakımından en olumsuz şartları temsil etmektedir.

2.1.1 Numune Hazırlama

MH zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması halinde göstereceği mekanik davranışların (hidrolik iletkenlik, sıkışabilirlik, kayma mukavemeti)

incelenebilmesi için yapılan deneysel çalışmada katkılı ve katkısız deney numunelerinin her biri aynı prosedürde hazırlanmıştır.

- Deney numunesi almadan önce malzeme 105 C°'lik etüvde 24 saat bekletilmiştir (Şekil 2.9a).
- Etüvden alınan malzeme sıcaklığını kaybettikten sonra hedeflenen su muhtevası değerleri için 24 saat ağzı kapalı bir poşette (poşet, strech film, alüminyum folyo, desikatör) desikatör içerisinde bekletilmiştir (Şekil 2.9b).
- 24 saat ağzı kapalı bir poşette bekletilen zemin, belirlenen su muhtevası ve kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmıştır (Şekil 2.9c).
- Şekil 2.9b'deki gibi hazırlanan her bir paketten ve Şekil 2.9c'deki gibi kompaksiyon yapılması için 24 saat sonra açılan her bir paketten su muhtevası örneği alınarak deney numunesinin hedeflenen su muhtevası değerine ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 2.9 Numune hazırlama prosedürü

a, b ve c maddelerinde belirtilen prosedür, 24 saat süresince 105 C°'lik bir etüvde kurumuş olan malzemenin 24 saat kapalı bir poşette bekletilmeksizin (b maddesinin uygulanmaması) ilgili su muhtevasında hazırlanması ile de uygulanmıştır. Ve her iki prosedür (b maddesinin uygulanması ve uygulanmaması durumu) için Şekil 2.4'te standart kompaksiyon enerjisi ile elde edilen optimum su muhtevası değerinde ($\%34,80 \pm \%35,00$) deney numuneleri hazırlanmış, deney numunelerinin 24 saat bekletilip bekletilmemesi durumlarında hedef su muhtevası değerine ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Her iki prosedür için ölçülen su muhtevası değerleri Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.3 Numune hazırlama prosedürü

<i>Hedef Su Muhtevası Değeri, (%)</i>	<i>Test Sayısı</i>	<i>1. Prosedür</i>	<i>2. Prosedür</i>
		(24 saat, 105 C ° etiüvde, 24 saat ağzı kapalı poşette <u>bekletilerek</u>)	(24 saat, 105 C ° etiüvde, 24 saat ağzı kapalı poşette <u>bekletilmeden</u>)
%34,80±%35,00	1	%34,70	%35,74
	2	%34,75	%35,50
	3	%34,48	%35,51
	4	%34,48	%35,66

Tablo 2.3'te sunulan su muhtevaları göz önünde bulundurulduğunda; deney numunelerinin hazırlandığı optimum su muhtevası değerine 1. Prosedür ile daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmüş, bu sebeple tüm deney numunelerinin hazırlanmasında 1. prosedür uygulanmasına karar verilmiştir.

MH zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması halinde göstereceği mekanik davranışların araştırılabilmesi için yapılan bu kapsamlı deneysel çalışmada kullanılan katkılı ve katkısız deney numunelerinin, hangi su muhtevası ve kompaksiyon enerji seviyesinde hazırlanması gerektiğine, katkısız zemin (MH) üzerinde yapılan ön deneme deneyleri ile karar verilmiştir. Bu amaçla, standart ve modifiye kompaksiyon enerjisi ile kompaksiyon parametrelerinin belirlendiği katkısız zemin (MH), optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkileri dikkate alınarak; optimum su muhtevası (w_{opt}) ve bu değer in ıslak tarafında ($w_{opt}+ \%2$ ve $w_{opt}+ \%5$) kalmak suretiyle her iki kompaksiyon enerji seviyesinde de sıkıştırılmıştır (Şekil 2.10a). Sıkıştırılan zeminden numune alımında, serbest basınç deneyleri için özel olarak yaptırılan ince cidarlı 3,5 cm çapında ve 7 cm boyundaki silindirik tüpler kullanılmıştır (Şekil 2.10b). Serbest basınç deneyleri için her bir kompaksiyon kabından 3'er adet numune alınmıştır. Numune alımları için laboratuvar da bulunan hidrolik krikolar, numunelerin tüp ve ringlerden çıkarılmasında kolaylık sağlaması için vazelin/yağ kullanılmıştır (Şekil 2.10c).



Şekil 2.10 Serbest basınç deneyleri için numune alımı

Hazırlanan deney numunelerine 0, 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma çözülme çevrimi uygulanmış, biten çevrimler sonunda numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası kütleleri tartılarak su muhtevaları hesap edilmiş, böylece numunelerin hedeflenen su muhtevasında hazırlanıp hazırlanmadığı da kontrol edilmiştir. Yapılan tüm deneylerde numunelerin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları da çekilerek kırılma düzlemleri incelenmiştir. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi ön deneme deneyleri için hazırlanan serbest basınç deney numuneleri su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde ve ne çok sıkı ne de çok gevşek olmayacak şekilde stretch filme sarılmış ve ilgili koşul (su muhtevası, kompaksiyon enerjisi, donma çözülme çevrim sayısı) için isimlendirilmiştir.



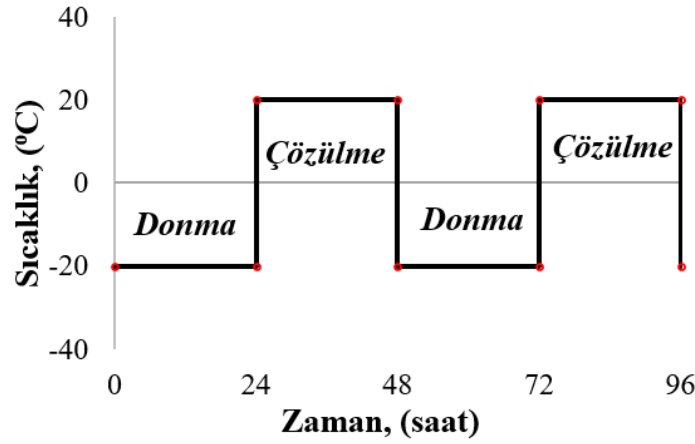
Şekil 2.11 Serbest basınç deneyleri için hazırlanan deney numuneleri

Şekil 2.11’deki gibi alınan deney numunelerinin farklı kompaksiyon kalıplarından alınması sebebi ile, her bir numune su muhtevası, kompaksiyon enerjisi, su muhtevası için isimlendirilmiş olsa da, numunelerin hangi kompaksiyon kalıbından alındığı da belirtilmiş, deney sonuçları değerlendirilirken bu kıstas da göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 2.11’deki gibi serbest basınç deneylerine hazır hale gelen deney numuneleri donma çözülme çevrimleri için Şekil 2.12’de yer alan donma çözülme kabine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.12 Donma çözülme kabini

Literatürde yer alan çalışmalar ve öneriler de dikkate alınarak, donma çözülme çevrimleri için Şekil 2.13'teki zaman (gün) ve sıcaklık (C°) değerleri baz alınmıştır.

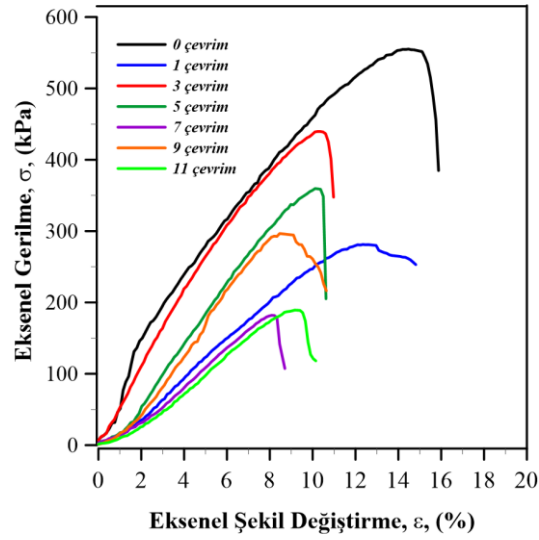


Şekil 2.13 Donma çözülme çevrim koşulları

Şekil 2.13'te de görüldüğü üzere, numuneler donma sürecini -20 C°'de 24 saat bekletilerek, çözülme sürecini ise +20 C°'de 24 saat bekletilerek tamamlamaktadırlar. Böylelikle, 1 donma çözülme (DÇ) çevrimini 2 günde tamamlamış bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, deney numunelerinin donma çözülme kabini içinde bekletildiği sıcaklık (-20 C° ve +20 C°) ve zaman (24 saat) koşullarında yeteri kadar donduğu el yordamıyla, yeteri kadar çözüldüğü de gözle kontrol edilmiştir.

Üç farklı su muhtevası (w_{opt} , $w_{opt}+\%2$, $w_{opt}+\%5$) ve iki farklı kompaksiyon enerjisi (standart ve modifiye kompaksiyon enerjisi) seviyesinde Şekil 2.9 ve Şekil 2.11'e uygun olarak hazırlanan, Şekil 2.13'e uygun olarak da donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Böylece, elde edilen sonuçlar ile en olumsuz durumu temsil eden koşul belirlenmiş, deneysel çalışmalarda izlenecek enerji seviyesi ve su muhtevası değerine karar verilmiştir.

Standart kompaksiyon enerjisi ile hazırlanan ve 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 kez olmak üzere 6 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakılan MH zemin üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları, optimum su muhtevası değerindeki numuneler için Şekil 2.14'te ve Tablo 2.4'te, optimum su muhtevasının ıslak tarafındaki ($w_{opt}+\%2$) numuneler için Şekil 2.15'te ve Tablo 2.5'te, optimum su muhtevasının ıslak tarafındaki ($w_{opt}+\%5$) numuneler için Şekil 2.16'da ve Tablo 2.6'da sunulmuştur.

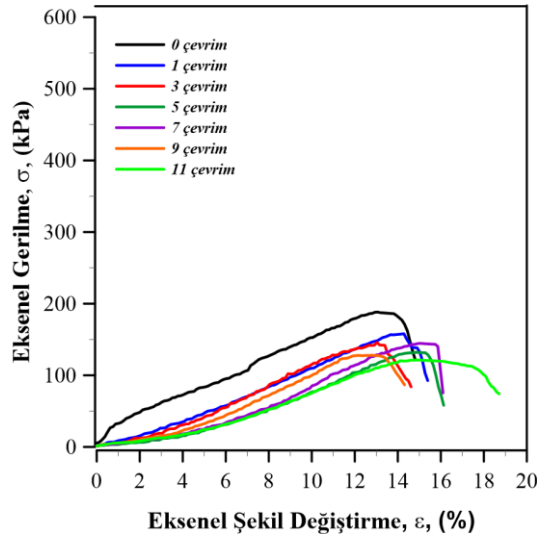


Şekil 2.14 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})

Tablo 2.4 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})

<i>Çevrim</i> <i>Sayısı</i>	<i>Deney Su</i> <i>Muhtevası, (%)</i>	<i>Max. Şekil</i> <i>Değişirme (%)</i>	<i>q_u</i> <i>(kPa)</i>
0	34,38	13,80	554
1	34,80	12,35	281
3	34,80	10,23	440
5	34,50	10,37	360
7	34,18	8,09	182
9	34,03	8,46	297
11	34,03	9,17	191

Şekil 2.14 ve Tablo 2.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde (q_u) azalmaya sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 evrim) katkısız zeminin serbest basınç mukavemeti, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla %49, %21, %35, %67, %46, %65 mertebesinde azalmıştır.



Şekil 2.15 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+\%2$)

Tablo 2.5 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+\%2$)

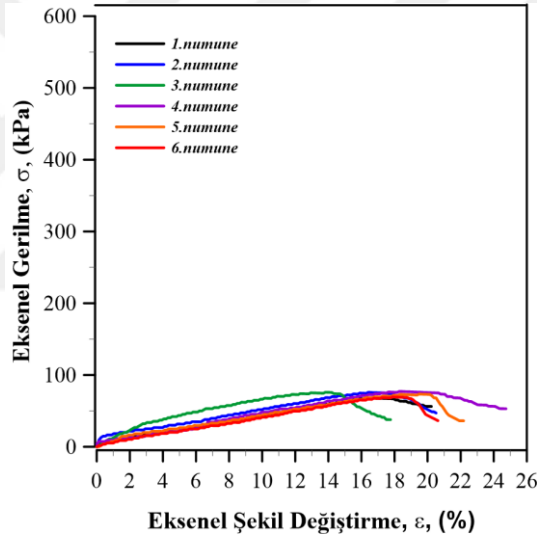
<i>Çevrim</i>	<i>Deney Su</i>	<i>Max. Şekil</i>	<i>q_u</i>
<i>Sayısı</i>	<i>Muhtevası, (%)</i>	<i>Değişirme (%)</i>	<i>(kPa)</i>
0	37,00	13,06	188
1	36,12	14,28	158
3	35,70	13,03	146
5	36,50	14,80	132
7	37,00	15,03	145
9	36,32	12,75	128
11	36,60	14,85	122

Şekil 2.15 ve Tablo 2.5'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde azalmaya sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) katkısız zeminin serbest basınç mukavemeti, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla %16, %23, %30, %23, %32, %35 mertebesinde azalmıştır.

Optimum su muhtevasında (w_{opt}) ve bu değer in ıslak tarafında ($w_{opt}+\%2$) standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanmış katkısız zemin üzerinde yapılan ve Şekil 2.14, Şekil 2.15, Tablo 2.4 ve Tablo 2.5'te sunulan serbest basınç deney sonuçları, her bir kompaksiyon kalıbından alınan 3 deney numunesi üzerinde yapılan deney verilerinin ortalamasını yansıtmaktadır. Yapılan serbest basınç deneyleri ile, farklı su muhtevalarında (w_{opt} , $w_{opt}+\%2$) ama aynı kompaksiyon

enerjisinde hazırlanmış katkısız MH zeminin, donma çözülme (DÇ) çevrimlerine maruz kalması durumundaki mukavemet davranışı incelenmiştir.

Herhangi bir DÇ çevrimine maruz kalmayan MH zeminin q_u değerleri w_{opt} ve $w_{opt}+0.2$ 'de hazırlanan deney numuneleri için sırasıyla 554 kPa ve 188 kPa olarak elde edilmiştir. Artan su muhtevasının etkisi ile elde edilen q_u değerlerinde %66 oranında bir mukavemet kaybı meydana gelmiştir. DÇ çevrimlerinin uygulanmadığı durumda dahi sadece su muhtevasındaki artıştan kaynaklı olarak %66'lık bir mukavemet kaybının meydana gelmesi sonucu, $w_{opt}+0.5$ 'te hazırlanan deney numuneleri ilk etapta DÇ çevrimlerine maruz bırakılmamış, çevrimsiz durum için mukavemet davranışı incelenmiştir. Standart kompaksiyon enerjisi ile $w_{opt}+0.5$ 'te hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları Şekil 2.16 ve Tablo 2.6'da sunulmuştur.



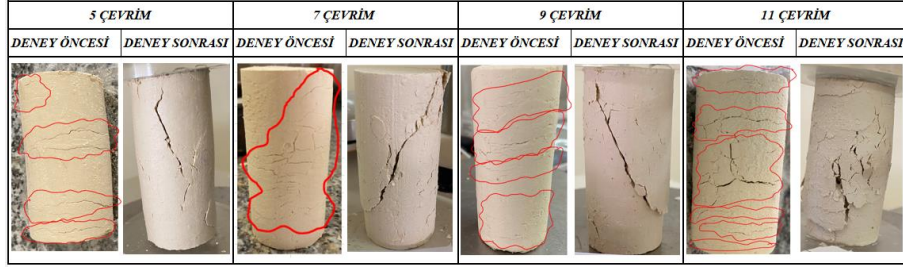
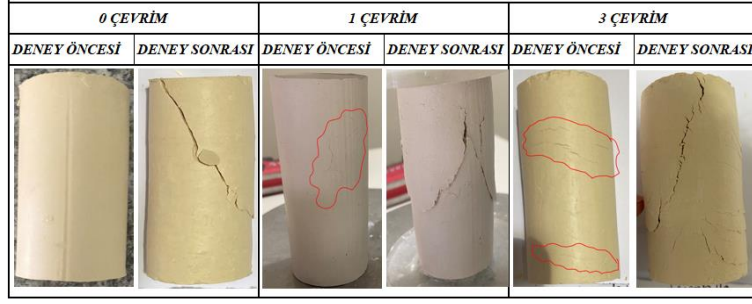
Şekil 2.16 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+0.5$)

Tablo 2.6 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+0.5$)

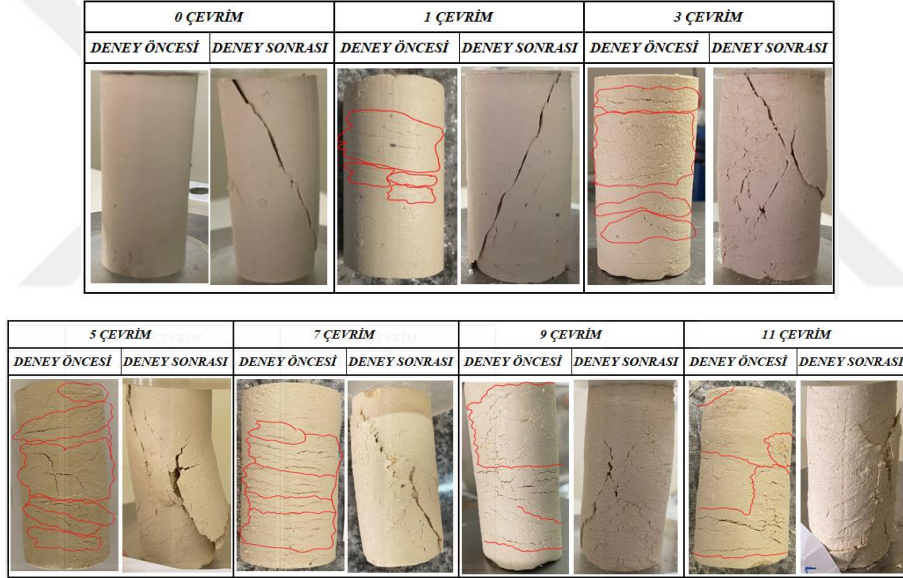
Numune	Deney Su Muhtevası, (%)	Max. Şekil Değişirme, (%)	q_u , (kPa)
1.	39,91	16,54	68
2.	39,75	16,41	76
3.	39,96	16,29	77
4.	39,37	13,83	76
5.	39,03	19,49	74
6.	40,98	17,88	70

Şekil 2.16 ve Tablo 2.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan ve $w_{opt}+\%5$ ’te standart kompaksiyon enerjisinde hazırlanan katkısız MH zeminin serbest basınç mukavemeti değeri ~ 74 kPa’dır. Herhangi bir DÇ çevrimine maruz kalmayan MH zeminin q_u değerleri w_{opt} ve $w_{opt}+\%5$ ’de hazırlanan deney numuneleri için sırasıyla 554 kPa ve 72 kPa olarak elde edilmiştir. Artan su muhtevasının etkisi ile elde edilen q_u değerlerinde $\%87$ oranında bir mukavemet kaybı meydana gelmiştir. $w_{opt}+\%5$ ’te hazırlanan katkısız MH zeminin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalması durumunda, mukavemetinde ciddi kayıplar meydana geleceği ve mukavemetinin ölçülemeyecek kadar düşük değer göstereceği bellidir. Bu sebeple, deney programında yer alan bu su muhtevası değeri için yapılması düşünülen deneyler iptal edilmiştir.

Serbest basınç deneylerine tabi tutulan tüm deney numunelerinin donma çözülme kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra, serbest basınç deneyi öncesi ve serbest basınç deney sonrası görüntüleri çekilmiştir. Böylece, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numunelerinin hasar durumu (donma çözülme öncesi ve sonrası) gözlemlenmiştir. Ayrıca, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılıp bırakılmadığı fark etmeksizin deney numunelerinin yük altındaki kırılma düzlemleri de incelenmiştir. Serbest basınç deney öncesi (donma çözülme kabinine yerleştirilip ilgili çevrim sonunda kabinden alındıktan sonraki) ve serbest basınç deney sonrası görüntüleri, w_{opt} için Şekil 2.17’de, $w_{opt}+\%2$ için Şekil 2.18’de sunulmuştur.



Şekil 2.17 Deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (w_{opt})



Şekil 2.18 Deney öncesi ve deney sonrası görüntüler ($w_{opt}+2\%$)

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmada göz önünde bulundurulacak su muhtevası ve kompaksiyon enerjisine karar verilebilmesi amacıyla yapılan ön deneylerde, standart kompaksiyon enerjisinin etkisi gözlemlenmiş ve elde edilen veriler detaylı bir biçimde Şekil 2.14-Şekil 2.16 ve Tablo 2.4-Tablo 2.6’da verilmiştir.

Aynı su muhtevası değerlerinde (w_{opt} , $w_{opt}+2\%$, $w_{opt}+5\%$) modifiye kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde de donma çözülme çevrimlerinin serbest basınç mukavemetine etkisinin incelenmesi planlanmıştır. Bu amaçla, numune hazırlama prosedürüne uygun bir biçimde hazırlanan zemin 24 saatlik kür sonunda modifiye kompaksiyon enerjisi ile kompakte edilmiştir. Ancak, numune kompaksiyonu sırasında ve kompakte edilen zeminden numune alım sırasında Şekil 2.19'daki gibi problemlerle karşılaşmıştır.



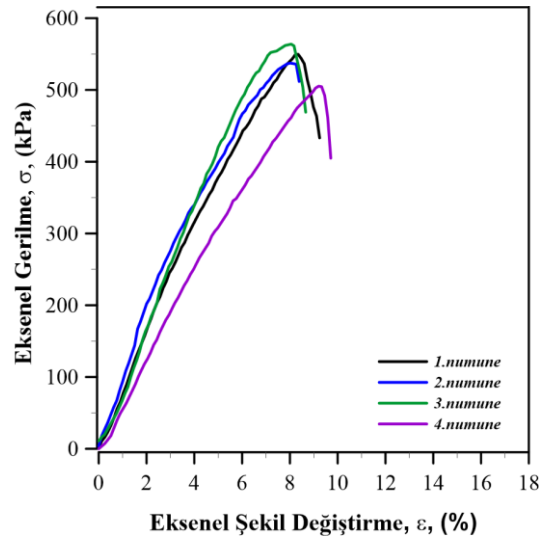
Şekil 2.19 Modifiye kompaksiyon enerjisi etkisi

Şekil 2.19'da verilen görüntülerde, kompaksiyon yapım sırasında 4,5 kg tokmağın zemin katmanına her düşüşünde zemin parçalanmıştır. Numune alımı sırasında ise katmanlar arasında geçişlerin belli olduğu, sağlıklı bir kompaksiyonun yapılamadığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.20'de görüldüğü üzere, hidrolik krik o yardımı ile kompakte edilen kalıba batırılan silindir tüplerden, numune alımında sorun yaşanmıştır. Alınan numuneler sağlam olmamakla beraber, alındığı anda kırılmıştır. Problemin numune alımı sırasında değil, iyi bir kompaksiyon yapılamadığından kaynaklı olduğu, iyi bir kompaksiyonun yapılamamasının sebebinin de zemin yapısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde, DÇ çevrimlerine maruz bırakılacak zemin için yapılan kompaksiyon ve numune alım süreçlerinde de birebir aynı sorunla karşılaşmıştır. DÇ çevrimine maruz bırakılan numunelerin her biri, strech filmin açılması sırasında kırılarak, kendini tutamamıştır. Deneyler için modifiye kompaksiyon enerjisinde numune alımının zorluğuna yaklaşık 14 kompaksiyon deneyi sonunda (normal koşullarda her bir kompaksiyon kabından 3 numune alındığı, 14 kompaksiyon sonunda 42 numune alınabileceği durumda) 15 numune alınması neticesinde karar verilmiştir.



Şekil 2.20 Modifiye kompaksiyon enerjisi ile numune alımı

Modifiye kompaksiyon enerjisi ile hazırlanan ve 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 kez olmak üzere 6 farklı donma çözülme çevrimine maruz bırakılması planlanan MH zemin üzerinde, yeterli sayıda numune alınamaması sebebiyle, donma çözülme çevrimleri uygulanamamıştır. Bunun yerine, sadece referans değerleri temsil edecek olan, donma çözülme çevriminin olmadığı şartlarda yapılan serbest basınç deney sonuçları w_{opt} 'da hazırlanan numuneler için Şekil 2.21'de ve Tablo 2.7'de, $w_{opt}+2\%$ 'de hazırlanan numuneler için Şekil 2.22'de ve Tablo 2.8'de, $w_{opt}+5\%$ 'te hazırlanan numuneler için Şekil 2.23'te ve Tablo 2.9'da sunulmuştur.

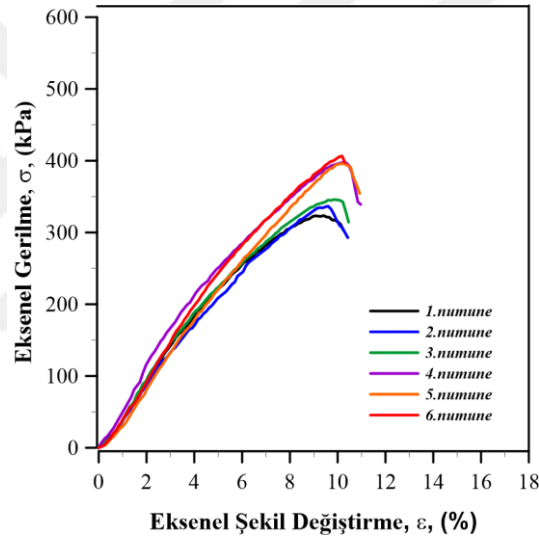


Şekil 2.21 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})

Tablo 2.7 Serbest basınç deney sonuçları (w_{opt})

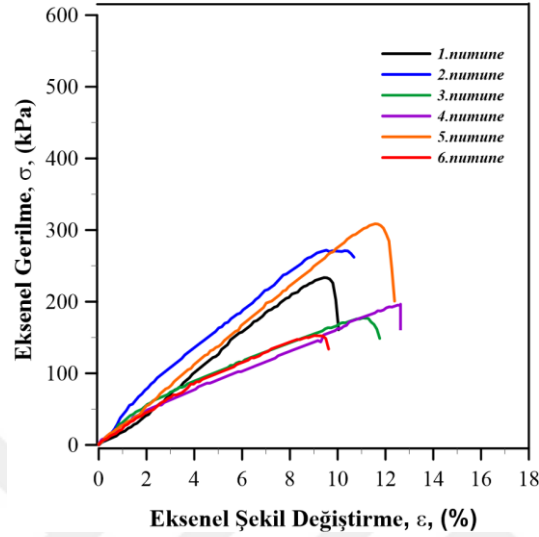
<i>Deney Sayısı</i>	<i>Deney Su Muhtevası, (%)</i>	<i>Max. Şekil Değişirme (%)</i>	<i>q_u (kPa)</i>
1	28,57	8,34	550
2	29,82	8,01	538
3	26,32	8,05	564
4	27,59	9,24	505

Şekil 2.21 ve Tablo 2.7’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, farklı kompaksiyon kalıplarından alınan deney numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri 550 kPa, 538 kPa, 564 kPa ve 505 kPa olarak ölçülmüştür. q_u ’nun ortalama değeri ~539 kPa olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 2.22** Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%2$)**Tablo 2.8** Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+ \%2$)

<i>Deney Sayısı</i>	<i>Deney Su Muhtevası, (%)</i>	<i>Max. Şekil Değişirme (%)</i>	<i>q_u (kPa)</i>
1	31,91	8,33	281
2	33,33	9,41	324
3	32,04	9,60	337
4	32,95	10,16	396
5	33,33	10,23	396
6	32,73	10,18	407

Şekil 2.22 ve Tablo 2.8’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, farklı kompaksiyon kalıplarından alınan deney numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri 281 kPa, 324 kPa, 337 kPa, 396 kPa ve 407 kPa olarak ölçülmüştür. q_u ’nun ortalama değeri ~357 kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.23 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+5\%$)

Tablo 2.9 Serbest basınç deney sonuçları ($w_{opt}+5\%$)

Deney Sayısı	Deney Su Muhtevası, (%)	Max. Şekil Değişirme (%)	q_u (kPa)
1	33,33	9,43	234
2	32,61	9,52	272
3	34,79	11,04	177
4	34,89	12,63	197
5	33,51	11,56	309
6	34,04	9,02	153

Şekil 2.23 ve Tablo 2.9’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, farklı kompaksiyon kalıplarından alınan deney numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri 234 kPa, 272 kPa, 177 kPa, 197 kPa, 309 kPa ve 153 kPa olarak ölçülmüştür. q_u ’nun ortalama değeri ~223 kPa olarak hesaplanmıştır.

Modifiye kompaksiyon enerjisi ile kompakte edilen katkısız zemin üzerinde yapılması planlanan serbest basınç deneyleri, w_{opt} için toplam 4 numune üzerinde, $w_{opt}+ \%2$ için toplam 6 numune üzerinde, $w_{opt}+ \%5$ için de toplam 6 numune üzerinde gerçekleştirilebilmiştir. Yapılan serbest basınç deneyleri, numune alınamamasından kaynaklı olarak sadece referans değerleri (0 çevrim, çevrimsiz) temsil etmektedir. Kompaksiyon ve numune alımı sırasında karşılaşılan sorunların bir göstergesi de Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da sunulan deney sonuçlarıdır. Aynı su muhtevası değerlerinde kompakte edilen zeminin serbest basınç deney sonuçları arasında fark görülmektedir. Özellikle, Tablo 2.9’da sunulan veriler göz önünde bulundurulduğunda; optimum su muhtevasının ıslak tarafında zeminin su muhtevasının fazla olması sebebiyle, sağlıklı bir biçimde kompaksiyon yapılamadığı elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden de görülmektedir.

Standart ve modifiye kompaksiyon enerjisi kullanılarak üç farklı su muhtevasında hazırlanan deney numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçlarına göre;

- Modifiye kompaksiyon enerjisi kullanılarak yapılan kompaksiyon deneylerinden yeterli sayıda ve uygunlukta serbest basınç deney numunesi alınamamıştır. Deney numunesinin alınamamasından dolayı, donma çözülme çevrimleri uygulanamamıştır. Bu durum göz önüne alındığında, modifiye kompaksiyon enerjisi kullanılarak yapılması planlanan deneyler **iptal edilmiştir**.
- Standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak hazırlanan deney numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları göz önüne alındığında; optimum su muhtevasının ıslak tarafında ($w_{opt}+ \%5$) yapılması planlanan deneylerin, DÇ çevrimine maruz bırakılmadığı durumda dahi optimum su muhtevasında (w_{opt}) hazırlanan numuneler ile karşılaştırıldığında mukavemet kaybının **%87** olması sebebi ile bu su muhtevasında deney **yapılmamasına** karar verilmiştir.

- Standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak hazırlanan deney numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları göz önüne alındığında; optimum su muhtevasının ıslak tarafında ($w_{opt} + \%2$) yapılan deneylerde çevrimler sonunda **%35** mertebesinde, optimum su muhtevasında (w_{opt}) yapılan deneylerde ise çevrimler sonunda **%65** mertebesinde mukavemet kaybı gözlemlenmiştir. $w_{opt} + \%2$ 'de hazırlanan numunelere uygulanan DÇ çevriminin çok fazla bir mukavemet kaybına sebebiyet vermediği görülmüş, bu sebeple iyileştirme çalışmasının **optimum su muhtevasında** hazırlanan numuneler üzerinde yapılmasına karar verilmiştir.
- Sogancı ve Yıldız (2012)'de, ince daneli zeminlerin optimum su muhtevasında kompakte edilmesinin performans için yeterli olduğunu, Zhou ve Boley (2009) ise sıkıştırma enerjisinin zeminin donma sıcaklığı üzerinde çok fazla etkisi olmadığını belirtmiştir.
- Tüm bunlara ilave olarak, özellikle FDM'nin zemin üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmaların hepsi optimum su muhtevası değerinde hazırlanan deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Mahedi vd., 2019; Kravchenko vd., 2020; Rao vd., 2021; Chen vd., 2021; Chen vd., 2022; Chen vd., 2023; Luo vd., 2023; Guo vd., 2024).
- Tüm bu sebeplerden dolayı, mFDM'nin donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zemin üzerindeki etkilerinin incelendiği bu tez çalışmasındaki deney programına, standart kompaksiyon enerjisi ve optimum su muhtevası değeri (w_{opt}) ile devam edilmiştir.

Donma çözülme çevrimlerinin zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi ve mFDM kullanarak davranışın iyileştirilmesi amacıyla yapılan deneysel çalışma programı Tablo 2.10'da sunulmuştur.

Tablo 2.10 Deneysel çalışma programı

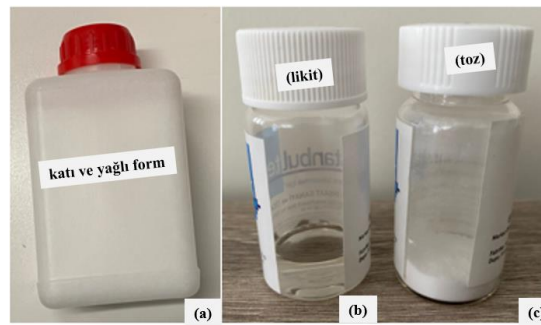
Çevrim Durumu	Deneyler	mFDM (%)				Toplam
		0	5	8	10	
Çevrimsiz Deneyler (Çevrim: 0)	<i>Sınıflandırma</i>	5	3	3	3	14
	<i>Kompaksiyon</i>	1	1	1	1	4
Çevrimli Deneyler Çevrim Sayısı: 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 Su Muhtevası: W_{opt} Enerji: Standart Kompaksiyon	<i>Görüntüleme Analizleri</i>			17		17
	<i>Mukavemet</i>	7	7	7	7	28
	<i>Oturma</i>	7	7	7	7	28
	<i>Hidrolik İletkenlik</i>	1	1	1	1	4
Toplam						95
<i>Sınıflandırma: Elek ve Hidrometre Analizi, Likit ve Plastik Limit, Lineer Büzülme.</i>						
<i>Kompaksiyon: Standart Kompaksiyon</i>						
<i>Görüntü Analizleri: DSC, FT-IR, XRD, XRF, SEM, Micro CT, ICP-MS, sıcaklık ölçümü.</i>						
<i>Hidrolik İletkenlik: Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleri</i>						
<i>Oturma: Tek Boyutlu Ödometre Deneyleri</i>						
<i>Mukavemet: Serbest Basınç Deneyleri</i>						

Tablo 2.10’da sunulduğu üzere katkılı ve katkısız zemin üzerinde toplam 95 adet deney yapılmıştır. Deneysel çalışmanın ilk etabında, her bir katkı oranı için zemin sınıfı ve kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevası değerinde hazırlanan katkılı ve katkısız karışımlar donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Tamamlanan donma çözülme çevrimlerinin akabinde deney numuneleri üzerinde serbest basınç, tek boyutlu ödometre ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonunda ise görüntüleme teknikleri kullanılarak zemin ve mFDM katkılı karışımların davranışları incelenmiştir.

2.2. Faz Değiştiren Malzeme (FDM)

FDM'ler organik (parafin olan ve parafin olmayan), inorganik (metalik, tuz hidrat) ve kompozit (organik-organik, inorganik inorganik, inorganik organik) olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Şekil 1.2). FDM seçiminde, çalışma sıcaklık aralığı (termal özellik), kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulmaktadır (Tablo 1.1). FDM çeşitleri birbiri ile kıyaslandığında, organik FDM'in diğer FDM'lere göre daha avantajlı olduğu görülmektedir (Crespoa vd., 2018; Waqas vd., 2018). Bu amaçla bu çalışmada, faz değişimi sırasında faz ayrımı olmadan sıvı faza ve tekrar faz ayrımı olmadan katı faza geçebilme kapasitesinden, çevre dostu olmasından, aşındırıcı özelliği bulunmamasından, kimyasal kararlılığından ve uygun maliyetli olmasından kaynaklı oda sıcaklığında likit halde bulunan parafin bazlı (tetradekan) organik FDM tercih edilmiştir.

Parafin bazlı organik FDM, ticari olarak İstanbul Teknik Ar-Ge Merkezi firmasından temin edilmiştir. Malzeme temin edildiğinde, Şekil 2.24a'daki gibi oda sıcaklığında katı ve yağlı bir formda bulunmaktadır. Katı ve yağlı formda bulunan FDM'nin yaklaşık olarak 40 C°'de etüvde ısıtılması sonucu malzemenin formu değişmekte, Şekil 2.24b'deki gibi likit olmaktadır. Şekil 2.24a'daki formda bulunan FDM'nin 40 C°'den daha yüksek sıcaklıklarda ısıtılması durumunda kimyasal yapısı bozulmaktadır.



Şekil 2.24 FDM formları

Mahedi vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada, likit haldeki parafini (FDM) doğrudan lös zemine dahil etmiş ve yüksek dozda FDM'nin önemli miktarda sızıntıya sahip olduğunu ve zeminin donma çözülme davranışını iyileştirmede başarısız olduğunu kanıtlamıştır. Bu da uygun bir birleştirme yöntemi bulmanın önemli olduğunu göstermiştir. Bu amaçla, likit parafinin doğrudan uygulanmamasının, mikrokapsülleme işlemine tabi tutulması gerektiği yapılan

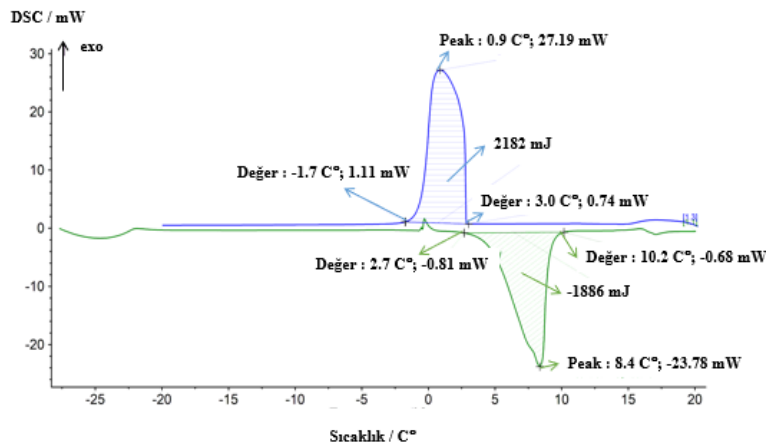
çalışmalar ile de önerilmiştir (Mahedi vd., 2019; Kravchenko vd., 2020; Rao vd., 2021; Chen vd., 2021; Chen vd., 2023; Luo vd., 2023). Mikrokapsülleme, FDM'in bir kabuk malzemesi ile kaplanması işlemi olup FDM'nin hacim değişikliklerine izin vererek dış çevreyle reaksiyonunu ve etkileşimini azaltmaktadır (Sarı vd., 2009). Kapsülleme işleminde, FDM'lerin küçük hacim kaplamalarından dolayı sızıntı riski yaşamaması, bu yöntemi avantajlı kılmakta ve likit FDM'nin kullanımındaki problemleri ortadan kaldırmaktadır (Dal vd., 2020). Literatür önerileri de göz önünde bulundurularak, temin edildiğinde Şekil 2.24b'deki gibi likit halde bulunan FDM'in zemin iyileştirmede kullanılması sonucundaki başarısızlığı sebebi ile, FDM temin edildiği şekliyle direkt kullanılmamış, firmanın kimya laboratuvarında sentezlenerek mikrokapsüllü hale getirtilmiştir. Likit halde bulunan FDM'nin çevresini kaplayan kimyasal bir kabuk ile kaplanması sonucu FDM toz haline gelmiştir (Şekil 2.24c). Likit FDM'nin sentezlenerek toz hale getirilme işlemi yavaş süren (günde 100gram mikrokapsüllenme) ve uzun zaman alan bir süreçtir. Bu sebeple, toz haline gelen mikrokapsüllü FDM firma tarafından zaman içerisinde 1'er kilo olacak şekilde Şekil 2.25'te olduğu gibi kutular içerisinde teslim alınmıştır.



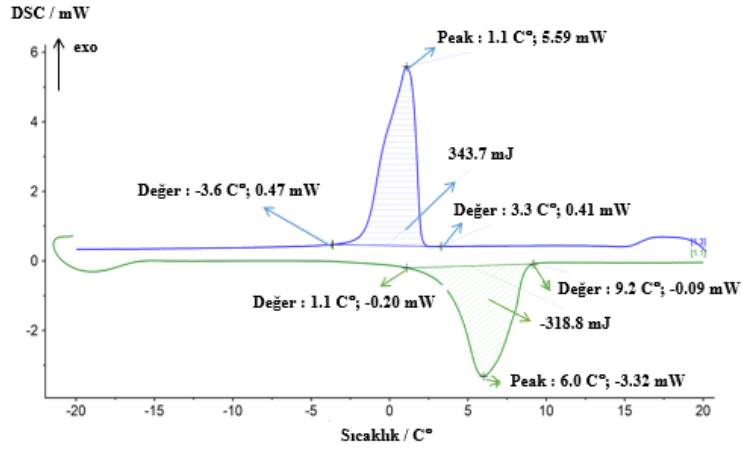
Şekil 2.25 Mikrokapsüllenmiş FDM (mFDM) teslim alınması

Sonuç olarak, yapılan çalışmalar ve öneriler doğrultusunda bu çalışmada, tahriş edici olmayan, kokusuz, çekirdek malzemesi tetradekan kimyasal yapısında parafin olan, uygulanan donma (-20 C°) ve çözülme ($+20\text{ C}^{\circ}$) sınır şartları arasında faz değiştirme özelliği gösteren beyaz renkli bir mFDM kullanılmıştır.

FDM'nin bu tez çalışmasında tercih edilmesinin ve kullanılmasının en önemli nedeni termal özelliğidir. Termal özelliğinin sağlayacağı avantajlardan kaynaklı, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin davranışlarının iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu nedenle, FDM'nin termal özelliklerinin ve faz değiştirme sıcaklık aralıklarının belirlenmesi, deneysel çalışmalarda uygulanacak donma çözülme sıcaklık şartlarının oluşturulmasında etkin rol oynamaktadır. Çünkü, faz değiştirme özelliği gösteren bu malzemelerin faz değiştirme sıcaklık aralıklarının, donma çözülme çevrim sıcaklık sınırları içerisinde kalması çalışmayı anlamlı kılmaktadır. Uygulanan sınır şartları arasında faz değiştirme özelliği göstermeyen malzemelerin çalışmalarda kullanılması herhangi bir olumlu etki yaratmayacak, aksine zaman, maliyet ve performans açısından olumsuz durum oluşturabilecektir. Bu amaçla, kullanılan FDM'nin termal özelliklerinin belirlenebilmesi için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi yapılmıştır. Mahedi vd. (2019), likit halde bulunan FDM ile mikrokapsüllenmiş halde bulunan FDM (mFDM)'nin çekirdek malzemesinin aynı olması sebebi ile termal özelliklerinin de aynı olduğunu belirterek, sadece likit halde olan FDM üzerinde DSC analizini gerçekleştirerek bunun yeterli olduğunu belirtmiştir. Likit FDM üzerinde yapılacak DSC analizinin yeterli olabileceği Mahedi vd. (2019) tarafından önerilmiş olsa da, bu çalışmada hem likit halde bulunan FDM'nin hem de mikrokapsüllenmiş halde bulunan FDM (mFDM)'nin termal özellikleri, NETZSCH DSC 3500 DSC cihazında incelenmiş ve elde edilen analiz sonuçları likit FDM için Şekil 2.26'da, mikrokapsüllenmiş FDM (mFDM) için Şekil 2.27'de sunulmuştur.



Şekil 2.26 DSC analiz sonuçları-likit FDM



Şekil 2.27 DSC analiz sonuçları-mFDM

Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de gösterilen tüm değerler Tablo 2.11’de özetlenmiştir. Zeminin termal özelliği bulunmadığından, DSC analizleri sadece likit ve mikrokapsüllü FDM üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.11 DSC analiz sonuçları

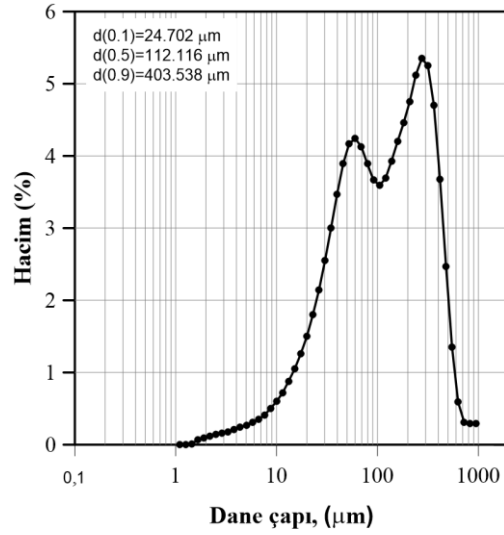
		<i>Likit FDM</i>	<i>mFDM</i>
	<i>Sıcaklık Aralığı (C°)</i>	2.7 ile 10.2	1.1 ile 9.2
<i>Erime</i>	<i>Tepe Sıcaklık (C°)</i>	8.4	6.0
<i>Süreci</i>	<i>Erime ısıtı (mJ)</i>	1886	318.8
	<i>Entalpi (J/g)</i>	200.6	81.75
	<i>Sıcaklık Aralığı (C°)</i>	-1.7 ile 3	-3.6 ile 3.3
<i>Katılaşma</i>	<i>Tepe Sıcaklık (C°)</i>	0.9	1.1
<i>Süreci</i>	<i>Erime ısıtı (mJ)</i>	2182	343.7
	<i>Entalpi (J/g)</i>	232.1	88.12

Şekil 2.26 ve 2.27’de DSC analiz sonucu verilen likit FDM ve mFDM’in faz geçiş aralıklarının ve entalpilerinin belirlenebilmesi için numune yüksek hassasiyetli (10^{-4}) bir terazide 4-10 mg arasında olacak şekilde tartılarak hazırlanmıştır. Analizler, azot gazı altında yapılmış olup, uygulanan sıcaklık aralığı -20 C° ile $+20\text{ C}^{\circ}$ arasındadır. Numune -20 C° ’de 2 dakika bekletilerek test başlatılmış ve $+20\text{ C}^{\circ}$ ’ye kadar ısıtılmıştır. Sonrasında numune $+20\text{ C}^{\circ}$ ’de 2 dakika tutulup -20 C° ’ye kadar soğutulmuştur. Isıtma ve soğutma işlemleri $2\text{ C}^{\circ}/\text{dk}$ hızda yapılmıştır.

Şekil 2.26’da ve Tablo 2.11’de sunulduğu gibi likit FDM’nin aktif olduğu sıcaklık aralıkları endotermik reaksiyon için $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında, ekzotermik reaksiyon ise -1.7 ile $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Bununla birlikte $2.7\text{ }^{\circ}\text{C} - 10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında likit FDM, $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik bir tepe faz değişim sıcaklığı (erime noktası) ile katıdan sıvıya bir faz değişimi yaşamıştır. Bu faz değişimi sırasında entalpisi $200,6\text{ J/g}$ olmuştur. $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında likit FDM $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ bir tepe faz değişim sıcaklığı ile sıvı fazdan katı faza geçmiştir. Bu faz değişimi sırasında entalpisi $232,1\text{ J/g}$ olmuştur. Katıdan sıvıya geçiş sürecinde FDM $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik bir genlikte erimeyi tamamlarken, sıvı halden katı hale geçişi $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir genlikte olmuştur.

Şekil 2.27’de ve Tablo 2.11’de gösterildiği gibi mFDM’nin aktif olduğu sıcaklık aralıkları endotermik reaksiyon için $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında, ekzotermik reaksiyon için ise $-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Bununla birlikte $1.1\text{ }^{\circ}\text{C} - 9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında mFDM, $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik bir tepe faz değişim sıcaklığı (erime noktası) ile katıdan sıvıya bir faz değişimi yaşamıştır. Bu faz değişimi sırasında entalpisi 81.75 J/g olmuştur. $-3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında mFDM $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ bir tepe faz değişim sıcaklığı ile sıvı fazdan katı faza geçmiştir. Bu faz değişimi sırasında entalpisi 88.12 J/g olmuştur. Katıdan sıvıya geçiş sürecinde mFDM $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik bir genlikte erimeyi tamamlarken, sıvı halden katı hale geçişi $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir genlikte olmuştur. Katı maddesi olarak kullanılan FDM’nin tek faz geçişi vardır.

Likit ve mikrokapsüllü halde bulunan FDM’nin termal özelliğinin belirlenmesi ve faz değiştirme sıcaklık aralıklarının tespit edilmesi, uygulanacak donma ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve çözülme ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) çevrimlerinin sınır sıcaklık değerleri arasında kalması, yapılacak çalışma açısından en önemli etkiye sahiptir. Bunun yanı sıra, bir katkı malzemesi olarak FDM’nin $<0.075\text{ mm}$ boyutunda bulunan zemin ile homojen bir şekilde karışım sağlayabilmesi için, dane boyutunun da zeminin dane boyutuna yakın olması büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla, mFDM üzerinde dane boyut analizi yaptırılmış ve Şekil 2.28’de sunulmuştur.



Şekil 2.28 mFDM'nin dane boyut dağılımı

mFDM üzerinde yapılan analiz ile malzemenin %10'unun 0.02 mm'nin, malzemenin %90'ının 0.4 mm altında olduğu belirlenmiştir.

Zeminin dane boyutlarının 0.075-0.002 mm arasında olduğu yapılan elek ve hidrometre analizleri ile belirlenmiştir (Şekil 2.3 ve Tablo 2.1). Her iki malzeme üzerinde yapılan dane boyutu analizleri ile mFDM'nin dane boyutunun küçük ve zeminin dane boyutuna yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, mFDM'nin geniş spesifik yüzey alanı ve güçlü yüzey adsorpsiyon kapasitesi, mikrokapsüllerin zemin ile homojen olarak karışmasında önemli rol oynamıştır. Zemin ve mFDM'in görselleri Şekil 2.29'da sunulmuştur.



Şekil 2.29 mFDM ve zeminin dane boyu görselleri

Şekil 2.29’da da görüldüğü üzere zemin krem renkte, mFDM ise hafif kirli beyaz renktedir.

Donma çözülme çevrim sınır sıcaklık değerleri arasında faz değiştirme özelliği gösteren mFDM ile donma çözülmeğe karşı yüksek oranda hassasiyet gösteren MH zeminin dane boyutlarının birbirine yakın oluşu, homojen karışımların oluşturulabilmesi ve uniform deney numunelerinin elde edilebilirliği açısından büyük avantaj sağlamıştır.

FDM’nin donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi 2019 yılında Mahedi vd. tarafından başlatılmış olup, devam eden çalışmalarda da Mahedi vd. (2019)’un önerileri göz önünde bulundurulmuştur. Araştırmacılar, FDM’yi zemin içerisine Tablo 1.8’de de özetlendiği üzere %2, %4, %5, %6, %7, %8, %10 oranlarında ilave etmişlerdir (Mahedi vd., 2019; Kravchenko vd., 2020; Rao vd., 2021; Chen vd., 2021; Chen vd., 2022; Chen vd., 2023; Luo vd., 2023; Liu vd., 2020; Guo vd., 2024). Literatür çalışmaları da göz önünde bulundurularak, FDM’nin zemin üzerindeki etkilerinin incelenmesi kapsamındaki bu tez çalışmasında %5, %8, %10, %12 katkı oranları dikkate alınmıştır. Araştırmacılar, donma çözülme çevrim sayısı için ise yine Tablo 1.8’de özetlendiği üzere, numunelere 0, 1, 3, 5, 7 olmak üzere 5 farklı çevrim uygulamışlardır. Literatür çalışmaları göz önünde bulundurularak, mFDM’nin zemin üzerindeki etkilerinin incelenmesi kapsamındaki bu tez çalışmasında 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 çevrim sayısı dikkate alınmıştır.

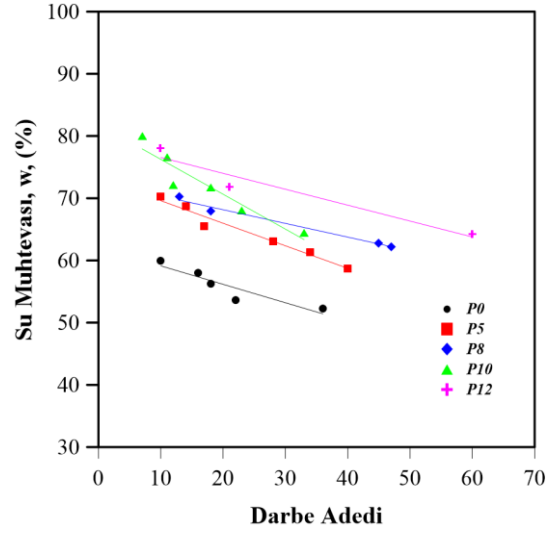
Deney programında yer alan deneylerin, katkı oranlarının, donma çözülme çevrim sayılarının fazla olması sebebi ile deney sonuçlarının kolay incelenebilmesi ve takibinin kolay yapılabilmesi için deneylerin isimlendirilmesi (kodlaması) yapılmış ve Tablo 2.12’de sunulmuştur.

Tablo 2.12 İsimlendirme

<i>mFDM</i>	<i>Donma Çözülme Çevrim Sayısı</i>						
<i>Oranı,</i>							
<i>(%)</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>11</i>
<i>0</i>	P0-0	P0-1	P0-3	P0-5	P0-7	P0-9	P0-11
<i>5</i>	P5-0	P5-1	P5-3	P5-5	P5-7	P5-9	P5-11
<i>8</i>	P8-0	P8-1	P8-3	P8-5	P8-7	P8-9	P8-11
<i>10</i>	P10-0	P10-1	P10-3	P10-5	P10-7	P10-9	P10-11
<i>12</i>	P12-0	P12-1	P12-3	P12-5	P12-7	P12-9	P12-11

Tablo 2.12’de yapılan isimlendirmede, ilk terim zemine katılan mFDM oranını, ikinci terim ise donma çözülme çevrim sayısını temsil etmektedir. Buna göre “P8-5”, %8 mFDM katkılı deney numunesinin 5 donma çözülme çevrimine maruz kaldığını ifade etmektedir. Zemin sınıflandırması ve kompaksiyon davranışının incelenebilmesi amacıyla yapılan likit limit, plastik limit ve standart kompaksiyon deneylerinde herhangi bir çevrim uygulanmadığı için, isimlendirme, katkı oranlarına göre P0, P5, P8, P10 ve P12 olacak şekilde yapılmıştır. Buna göre “P10”, %10 mFDM katkılı deney numunesini temsil etmektedir.

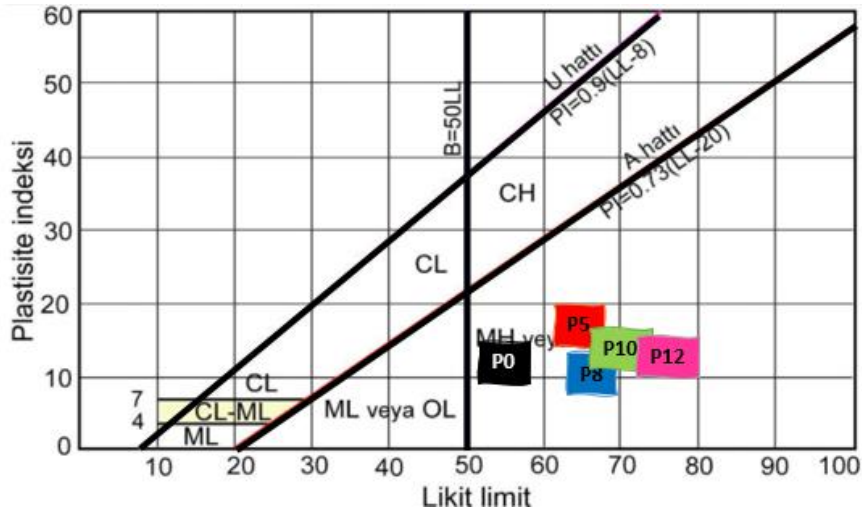
Deneyisel çalışmaların ilk etabında, ilgili katkı oranlarındaki (%5, %8, %10, %12) mFDM’nin zemine (zeminin kuru kütlelerinin) ilave edilmesi ile zemin sınıfının ve zeminin don hassasiyetinin değişip değişmediği kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla laboratuvarında, zemine kuru kütlelerinin %5, %8, %10 ve %12 oranlarında ilave edilen mFDM ile oluşturulan homojen karışımlar üzerinde kıvam limitleri (likit limit, plastik limit, lineer rötre) yapılmıştır. Karışımlar üzerinde yapılan likit limit deney sonuçları Şekil 2.30’da, likit limit ve plastisite indeksi kullanılarak yapılan zemin ve don hassasiyeti sınıflandırması ile lineer rötre sonuçları Tablo 2.13’te, her bir katkı oranı için hazırlanan karışımların Casagrande kartındaki konumları ise Şekil 2.31’de sunulmuştur.



Şekil 2.30 P0, P5, P8, P10 ve P12 likit limit deney sonuçları

Tablo 2.13 P0, P5, P8, P10 ve P12 deney sonuçları

	P0	P5	P8	P10	P12
Likit Limit, w_L, (%)	54,00	64,00	67,00	68,00	73,00
Plastik Limit, w_p, (%)	37,19	46,00	57,00	54,00	54,92
Plastisite İndeksi, I_p, (%)	16,79	18,00	10,00	14,00	18,56
Lineer Rötire, (%)	4,07	4,29	5,06	5,32	4,78
Zemin Sınıfı (USCS)	MH	MH	MH	MH	MH
Don Duyarlılığı	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek



Şekil 2.31 P0, P5, P8, P10 ve P12'nin Casagrande kartındaki konumları

Şekil 2.30, Şekil 2.31 ve Tablo 2.13' te sunulan deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda; mFDM ilavesinin zeminin likit limitini arttırdığı, zemin sınıfını ve zeminin don hassasiyetini değiştirmedeği belirlenmiştir. Tüm FDM oranları için, zemin sınıfı MH'tır ve tüm katkı oranları için zeminin don hassasiyeti yüksek mertebededir (Tablo 2.2).

mFDM'nin zeminin kıvam limiti, zemin sınıfı ve zeminin don hassasiyet sınıfı üzerindeki etkilerinin belirlenmesinin ardından, zeminin kompaksiyon davranışı üzerindeki etkileri de belirlenmiştir. Bu amaçla laboratuvarında, zemine kuru kütlelerinin %5, %8, %10 ve %12 oranlarında ilave edilen mFDM ile oluşturulan homojen karışımlar üzerinde standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır.

Kompaksiyon deneyleri yapım aşamasında;

105 C° sıcaklığa sahip etüvde 24 saat bekletildikten sonra sıcaklığını kaybeden (soğuyan) zemin içerisine mFDM, %5, %8, %10, %12 oranlarında ilave edilmiştir (Şekil 2.32a-Şekil 2.32e).

Plastik bir el küreği yardımıyla karıştırılan kuru zemin ve mFDM, yaklaşık olarak 15 dk. boyunca nazik bir biçimde harmanlanmıştır (Şekil 2.32f).

Havası alınmış su, bir sprey şişe yardımıyla zemin ve mFDM karışımının üzerine ilave edilmiş ve bir el küreği ile mFDM'lere baskı uygulamadan (mikrokapsülleri patlatmadan) tüm karışım homojen hale getirilmiştir (Şekil 2.32g-Şekil 2.32i).

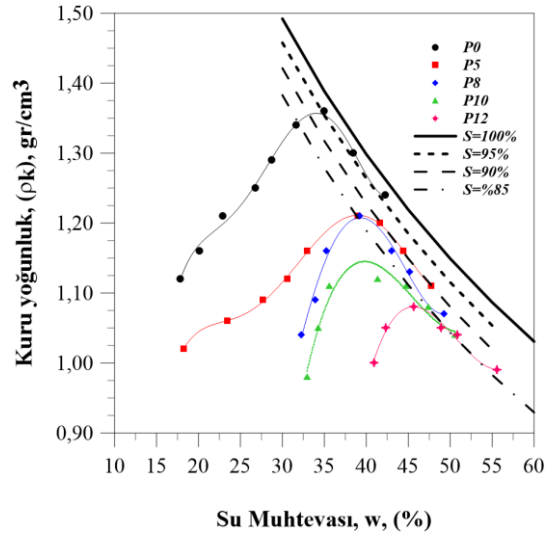
Her bir mFDM oranı için, hazırlanan karışımlar kompakte edilmiştir (Şekil 2.32j-Şekil 2.32k). Yapılan kompaksiyon deneyleri ile kompaksiyon parametreleri

belirlenmiş, mFDM'nin zemin içerisindeki homojen dağılımı da gözlemlenmiştir (Şekil 2.32l-Şekil 2.32m)



Şekil 2.32 Kompaksiyon adımları

Şekil 2.32'deki adımlar doğrultusunda yapılan standart kompaksiyon deneylerinde elde edilen optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{kmax.}$) ilişkisi her bir katkı oranı için Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te sunulmuştur.



Şekil 2.33 Kompaksiyon deney eğrileri

Tablo 2.14 Kompaksiyon deney sonuçları

	<i>P0</i>	<i>P5</i>	<i>P8</i>	<i>P10</i>	<i>P12</i>
ρ_{kmax} (g/cm ³)	1,36	1,21	1,19	1,15	1,08
w_{opt} (%)	34,80	39,00	39,00	40,00	46,00

Şekil 2.33 ve Tablo 2.14’te sunulan deney sonuçları dikkate alındığında, zemine göre daha hafif özgül ağırlıkta olan mFDM’nin, zemine ilave edildiği oranın artması ile zeminin maksimum kuru yoğunluğunda azalma, optimum su muhtevasında artma meydana gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, mFDM katkısı olmayan (katkısız-P0) deney numunelerinin hangi yöntemle hazırlanacağı yapılan deneme deneyleri ile incelenmiş ve sonuçlar Tablo 2.3’te detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Hedeflenen su muhtevası değerine 1. prosedür uygulanarak daha doğru bir şekilde ulaşıldığı görülmüştür. mFDM katkılı zemin karışımları için numune hazırlama yöntemine ise hem literatür önerileri hem de laboratuvarında yapılan deneme su muhtevası deneyleri ile karar verilmiştir. Chen vd. (2021), çalışmalarında mFDM katkılı zemin için deney numunesi hazırlarken Tablo 2.3’teki 1. prosedürün, Rao vd. (2021) ise Tablo 2.3’teki 2. prosedürün uygulanması gerektiğini önermiştir. FDM, termal özelliği olan bir malzeme olduğundan, deneylere başlamadan önce 2 prosedür de detaylı bir biçimde incelenerek olabilecek sorunlar ve farklar gözlemlenmiştir. Bu maksatla, mFDM için en önemli parametre olan sıcaklık etkisi göz önünde tutularak, her 2 prosedür ile de hazırlanan deney numuneleri üzerinde donma çözülme çevrimi uygulanmış, deney numunelerinin su muhtevaları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki prosedür ile hazırlanan deney numuneleri için aynı sonuçları vermiştir. Bu doğrultuda, zamandan tasarruf edebilmek amacıyla mFDM katkılı zemin için deney numunesi hazırlanırken 2. prosedür uygulanmıştır.

3

MUKAVEMET DAVRANIŞI

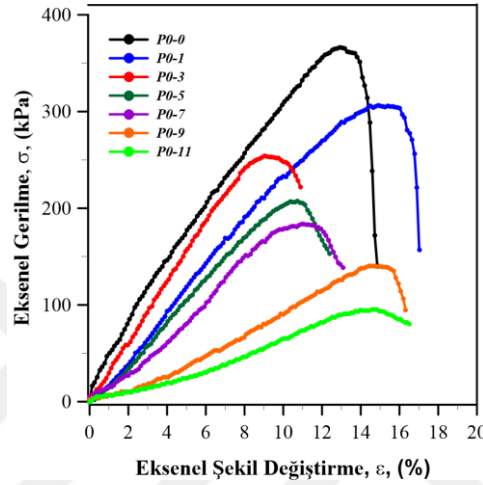
3.1 Serbest Basınç Deneyleri

%5, %8, %10 ve %12 oranlarında zemine ilave edilen mFDM'nin, Atterberg limitleri ve kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değeri) üzerindeki etkileri 2. Bölümde belirlenmiştir. Yapılan bu deneyler ile donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan mFDM katkılı zemin karışımlarının davranışı incelenmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının mukavemet davranışı ise laboratuvarında yapılan serbest basınç deneyleri ile incelenmiştir. Bu amaçla, Tablo 2.3'te belirtilen 2. prosedür baz alınmış, her bir karışım Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te belirlenen optimum su muhtevası değerinde ve standart kompaksiyon enerjisinde Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'daki gibi sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan Şekil 2.11'deki gibi alınan numuneler, Şekil 2.12'deki gibi donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmak üzere donma çözülme kabineye yerleştirilmiştir. Şekil 2.13'teki gibi uygulanan donma çözülme çevrimleri tamamlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

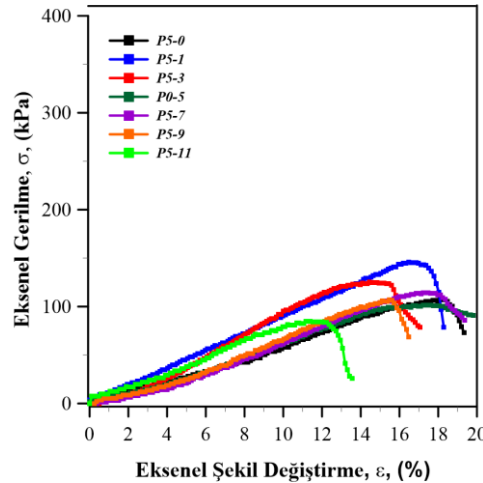
Belirtilen prosedürlere uygun olarak hazırlanan deney numuneleri üzerinde donma çözülme çevrimi uygulanarak/uygulanmadan serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme çevrimleri uygulanmadan katkısız (%0 mFDM-P0) ve katkılı (5, 8, 10, 12% mFDM-P5, P8, P10, P12) numuneler üzerinde yapılan deneyler, referans deneyler olarak kabul edilmiştir. Aynı prosedürde hazırlanan katkısız ve katkılı numunelerin 1, 3, 5, 7, 9, ve 11 donma çözülme çevriminden sonra yapılan deneyler ise referans deneyler ile karşılaştırılmıştır. ASTM D2166 yönetmeliğine göre yapılan serbest basınç deneylerinde kullanılan 3,5 cm çapında ve 7 cm yüksekliğindeki numuneler, 1.27 mm/dk sabit kesme hızında yüklenerek numunenin serbest basınç mukavemeti (q_u) belirlenmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkılı (P5, P8, P10, P12) ve katkısız (P0) zemin üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_u) ve şekil değiştirme (ϵ) ilişkileri, P0 için Şekil 3.1’de, P5 için Şekil 3.2’de, P8 için Şekil 3.3’te, P10 için Şekil 3.4’te, P12 için Şekil 3.5’te ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuş ve donma çözülme çevrimlerinin zeminin mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.



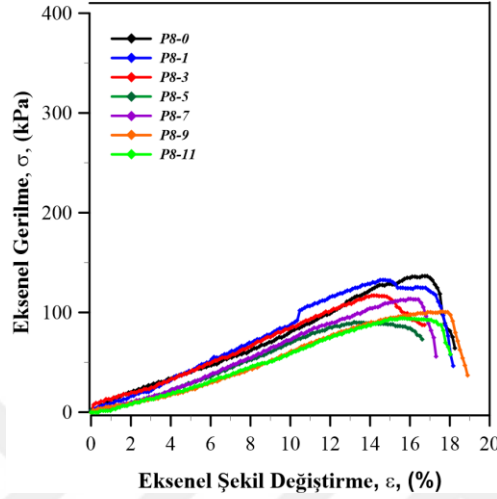
Şekil 3.1 P0 için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.1’de verilen katkısız (P0) zeminin serbest basınç deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde ciddi oranda (%74) kayıp meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen mukavemet değerleri, maksimum 366 kPa (0 çevrim) ile minimum 95 kPa (11 çevrim) aralığındadır.



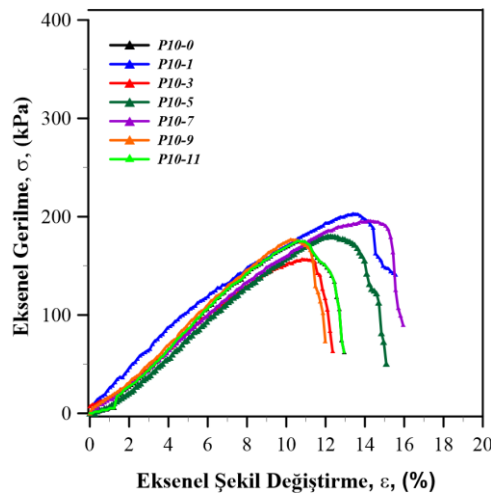
Şekil 3.2 P5 için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.2’de verilen %5 mFDM katkılı (P5) zeminin serbest basınç deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde düşük oranda (%21) kayıp meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen mukavemet değerleri, maksimum 146 kPa (1 çevrim) ile 85 kPa (11 çevrim) aralığındadır.



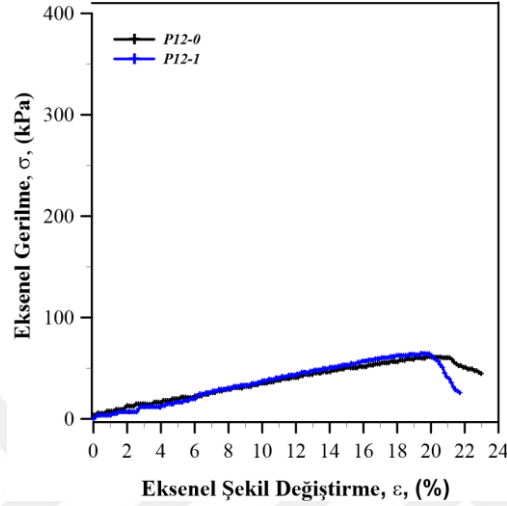
Şekil 3.3 P8 için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.3’te verilen %8 mFDM katkılı (P8) zeminin serbest basınç deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde düşük oranda (%31) kayıp meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen mukavemet değerleri, maksimum 136 kPa (0 çevrim) ile minimum 90 kPa (5 çevrim) aralığındadır.



Şekil 3.4 P10 için q_u - ϵ ilişkisi

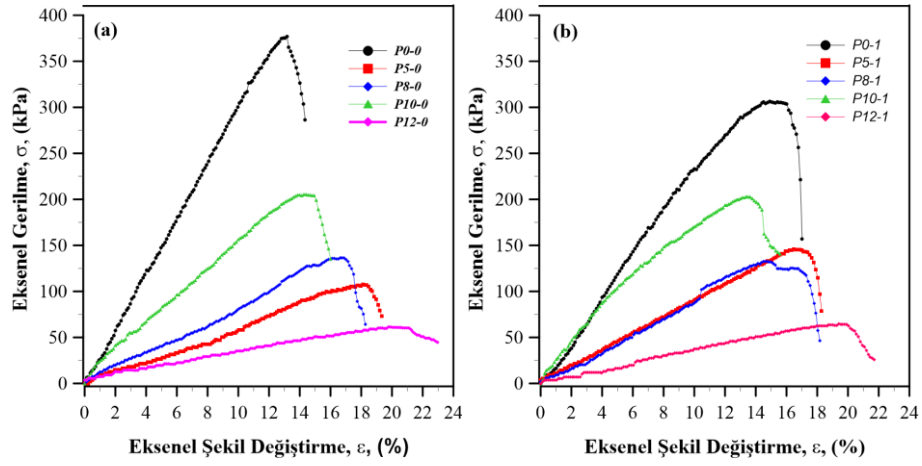
Şekil 3.4’de verilen %10 mFDM katkılı (P10) zeminin serbest basınç deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde düşük oranda (%15) kayıp meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen mukavemet değerleri, maksimum 206 kPa (0 çevrim) ile minimum 156 kPa (3 çevrim) aralığındadır.



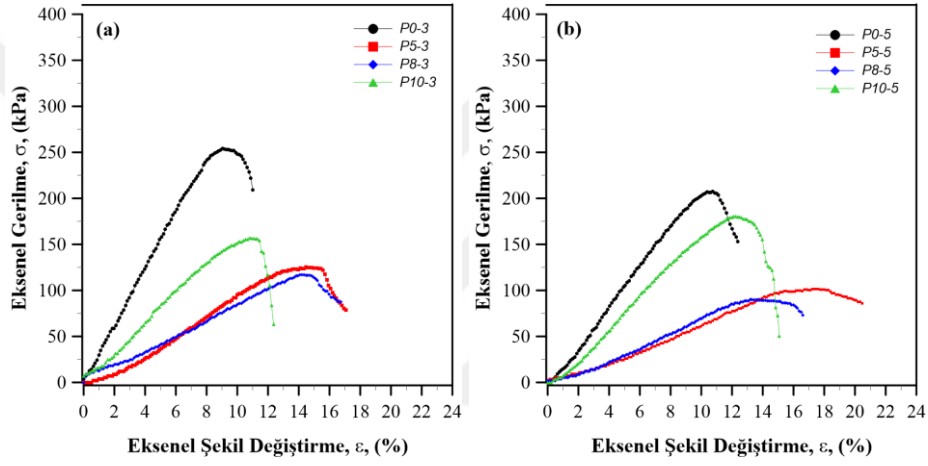
Şekil 3.5 P12 için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.5’te verilen %12 mFDM katkılı (P12) zeminin serbest basınç deney sonuçlarına göre, %12 mFDM katkılı zeminin herhangi bir donma çözülme çevrimine maruz kalmaması durumunda dahi çok düşük mukavemet (65 kPa) değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple, P12 deney numuneleri üzerinde sadece 1 donma çözülme çevrimi uygulanmış, diğer çevrimlere devam edilmemiştir.

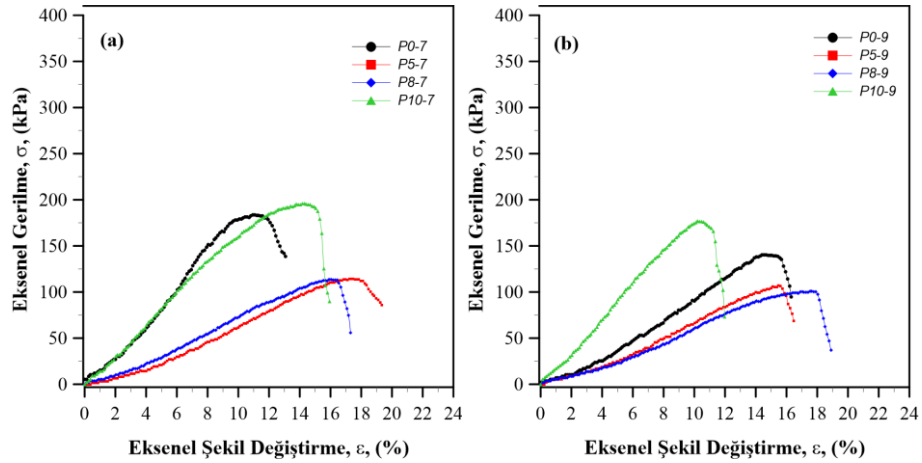
Bunun yanı sıra, değişen donma çözülme çevrim sayısının katkılı ve katkısız zemin üzerindeki etkisi, her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde incelenmiş, gerilme-şekil değiştirme davranışı 0 ve 1. çevrim için Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b’de, 3. ve 5. çevrim için Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b’de, 7. ve 9. çevrim için Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b’de, 11. çevrim için Şekil 3.9’da sunulmuştur.



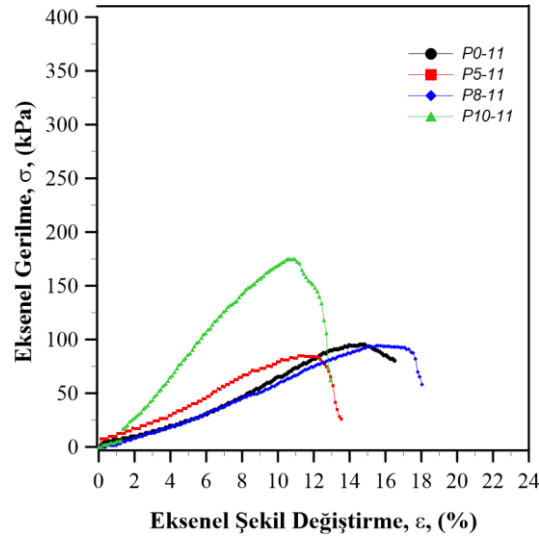
Şekil 3.6 q_u - ε ilişkisi (Çevrimsiz ve 1. çevrim)



Şekil 3.7 q_u - ε ilişkisi (3. çevrim ve 5. çevrim)



Şekil 3.8 q_u - ε ilişkisi (7. çevrim ve 9. çevrim)



Şekil 3.9 q_u - ϵ ilişkisi (11. çevrim)

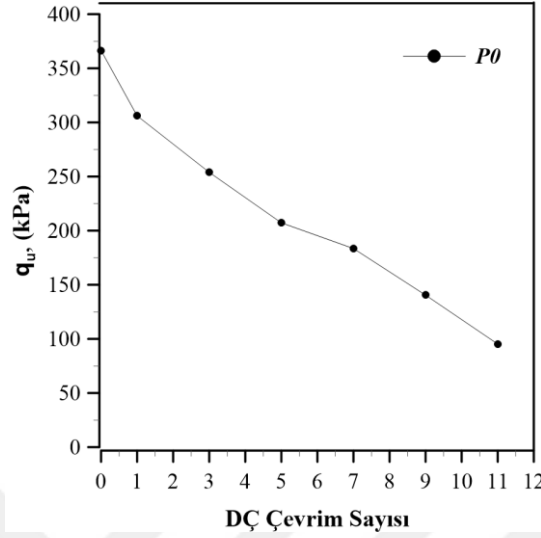
Şekil 3.1-3.9'de sunulan grafiklerde, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkılı ve katkısız zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı açık bir biçimde sunulmuştur. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin mukavemet değerlerinde azalma meydana geldiği, ancak bu durumun mFDM ile iyileştirilebileceği görülmüştür. %12 mFDM katkı oranının, zeminin mukavemet değerini çok ciddi oranda düşürmesi sebebi ile sadece 1 donma çözülme çevrimi uygulanmış ve deney yapımına devam edilmemiştir. Bu katkı oranı, bu sebeple deneysel çalışma programından çıkarılmıştır.

Şekil 3.1-Şekil 3.9'da sunulan gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden elde edilen q_u (kPa) ve maksimum şekil değiştirme (göçme şekil değiştirmesi, ($\epsilon_{göçme}$)) değerleri Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1 P0, P5, P8, P10 ve P12 için q_u - $\varepsilon_{göçme}$ değerleri

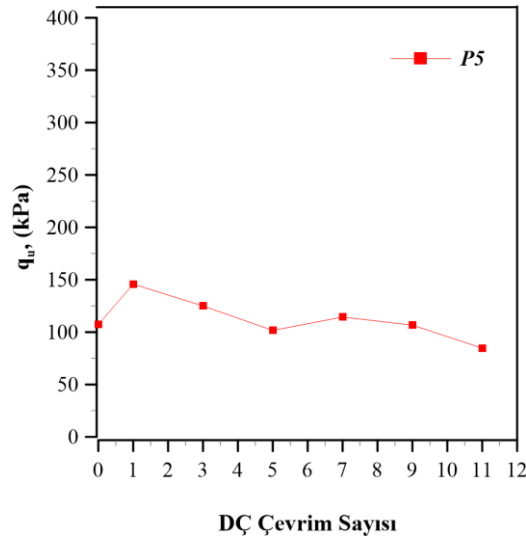
<i>ID</i>	<i>$\varepsilon_{göçme}$</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)	<i>ID</i>	<i>$\varepsilon_{göçme}$</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)
P0-0	12,92	366	P5-0	18,10	107
P0-1	14,89	306	P5-1	16,47	146
P0-3	9,260	254	P5-3	14,46	125
P0-5	10,74	207	P5-5	17,23	102
P0-7	10,94	184	P5-7	17,23	114
P0-9	14,42	140	P5-9	15,49	107
P0-11	14,59	95	P5-11	11,14	85
<i>ID</i>	<i>$\varepsilon_{göçme}$</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)	<i>ID</i>	<i>$\varepsilon_{göçme}$</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)
P8-0	16,62	137	P10-0	14,27	206
P8-1	14,51	133	P10-1	13,40	203
P8-3	14,07	117	P10-3	10,80	157
P8-5	13,32	90	P10-5	12,12	180
P8-7	15,91	114	P10-7	14,17	196
P8-9	16,91	100	P10-9	10,22	177
P8-11	15,49	94	P10-11	10,58	175

Tablo 3.1’de sunulan q_u değerleri ile donma çözülme (DÇ) çevrim sayısı arasındaki ilişki, P0 için Şekil 3.10’da, P5 için Şekil 3.11’de, P8 için Şekil 3.12’de, P10 için Şekil 3.13’te ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



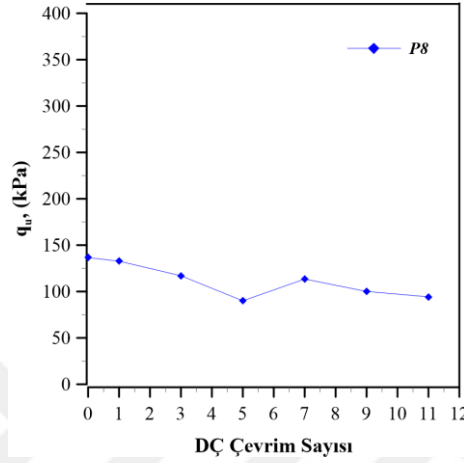
Şekil 3.10 P0 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.10 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde (q_u) azalmaya sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) katkısız zeminin serbest basınç mukavemeti, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla %16, %31, %43, %50, %62, %74 mertebesinde azalmıştır.



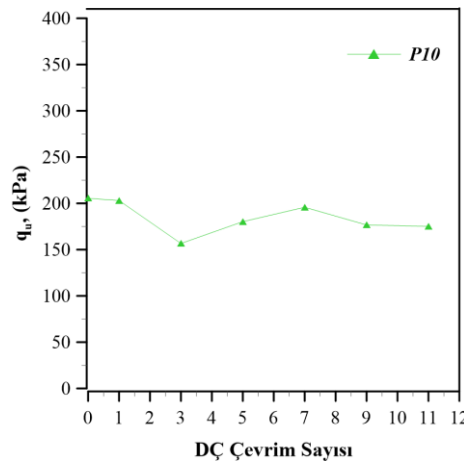
Şekil 3.11 P5 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.11 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin %5 mFDM katkılı zeminin serbest basınç mukavemetini dar bir aralıkta değiştirdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) zeminin serbest basınç mukavemeti 107 kPa iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 146 kPa, 125 kPa, 102 kPa, 114 kPa, 107 kPa, 85 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.12 P8 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi

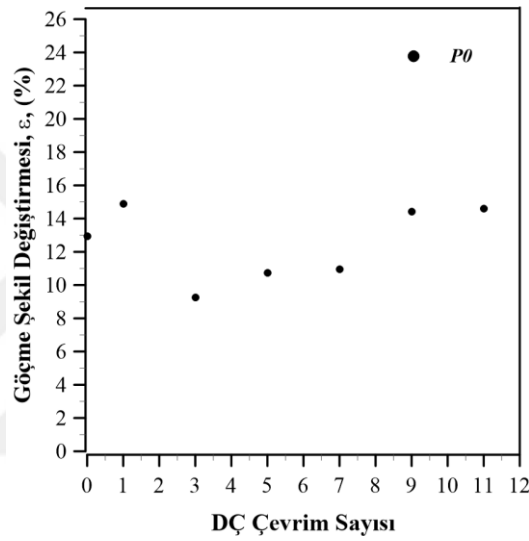
Şekil 3.12 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin %8 mFDM katkılı zeminin serbest basınç mukavemetini dar bir aralıkta değiştirdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) zeminin serbest basınç mukavemeti 107 kPa iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 133 kPa, 117 kPa, 90 kPa, 114 kPa, 100 kPa, 94 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.13 P10 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi

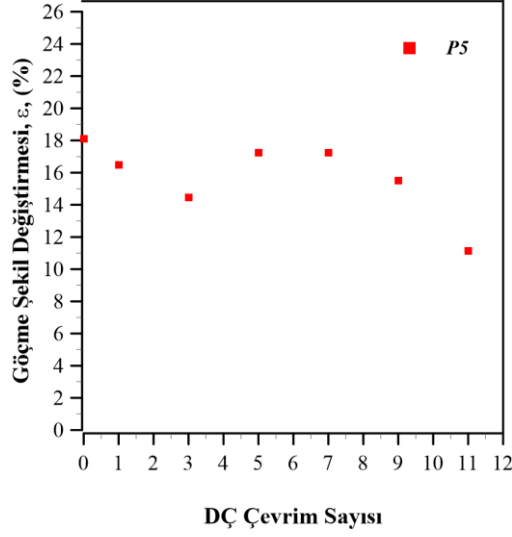
Şekil 3.13 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin %10 mFDM katkılı zeminin serbest basınç mukavemetini dar bir aralıkta değiştirdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) zeminin serbest basınç mukavemeti 206 kPa iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 203 kPa, 157 kPa, 180 kPa, 196 kPa, 177 kPa, 175 kPa olarak elde edilmiştir.

Benzer şekilde, Tablo 3.1’de sunulan $\varepsilon_{göçme}$ değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki, P0 için Şekil 3.14’te, P5 için Şekil 3.15’te, P8 için Şekil 3.16’da, P10 için Şekil 3.17’de ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



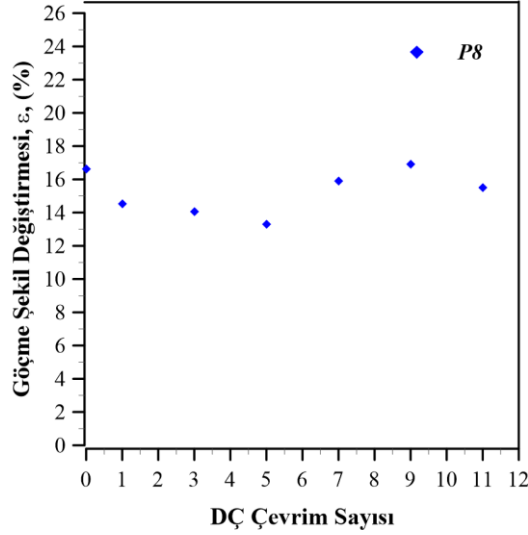
Şekil 3.14 P0 için $\varepsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.14 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız zeminin (P0) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %12,92, %14,89, %9,26, %10,74, %10,94, %14,42 ve %14,59 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi 1. çevrimde artmış, 3. çevrimde azalmış, 3. çevrimden sonra kademeli olarak artmıştır.



Şekil 3.15 P5 için $\varepsilon_{\text{göçme}}$ -DÇ çevrim ilişkisi

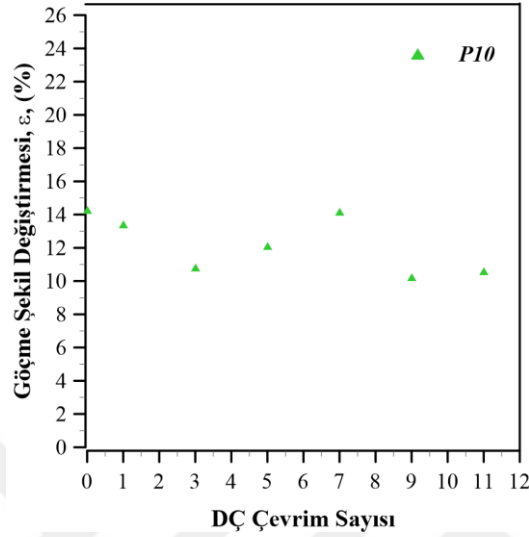
Şekil 3.15 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan %5 mFDM zeminin (P5) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %18,10, %16,47, %14,46, %17,23, %17,23, %15,49 ve %11,14 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi 3. çevrime kadar azalmış, 5. ve 7. çevrimlerde sabit kalmış, 7. çevrimden sonra tekrar azalmıştır.



Şekil 3.16 P8 için $\varepsilon_{\text{göçme}}$ -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.16 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan %8 mFDM

zeminin (P8) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %16,62, %14,51, %14,07, %13,32, %15,91, %16,91 ve %15,49 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi 5. çevrime kadar azalmış, 7. ve 9. çevrimlerde artmış, 11. çevrimde tekrar azalmıştır.



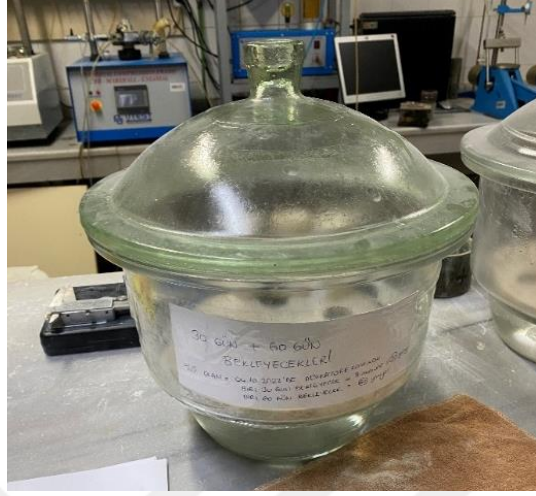
Şekil 3.17 P10 için $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.17 ve Tablo 3.1’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan %10 mFDM zeminin (P10) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %14,27, %13,40, %10,80, %12,12, %14,17, %10,22 ve %10,58 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi 5. çevrime kadar azalmış, 5. ve 7. çevrimlerde artmış, 7. çevrimden sonra tekrar azalmıştır.

Şekil 3.14-Şekil 3.17’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışında ve zeminin göçme şekil değiştirmesi değerinde değişikliğe sebep verdiği görülmüştür. Ancak, göçme şekil değiştirmesi değerlerinde belli bir azalış ya da artış meydana gelmeyerek, her bir katkı oranı için farklı davranış eğilimi görülmüştür.

Bir önceki bölümde “2.1.1. Numune Hazırlama Metodu” başlığında da detaylı bir biçimde de açıklandığı üzere; serbest basınç deneyleri için hazırlanan deney numunelerinin donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmadığı (P0-0, P5-0, P8-0, P10-0, P12-0) durumlarda, deney numuneleri deney başlangıcına kadar desikatörde bekletilmiş, bu sürenin 2 günden fazla olmamasına özen gösterilmiştir

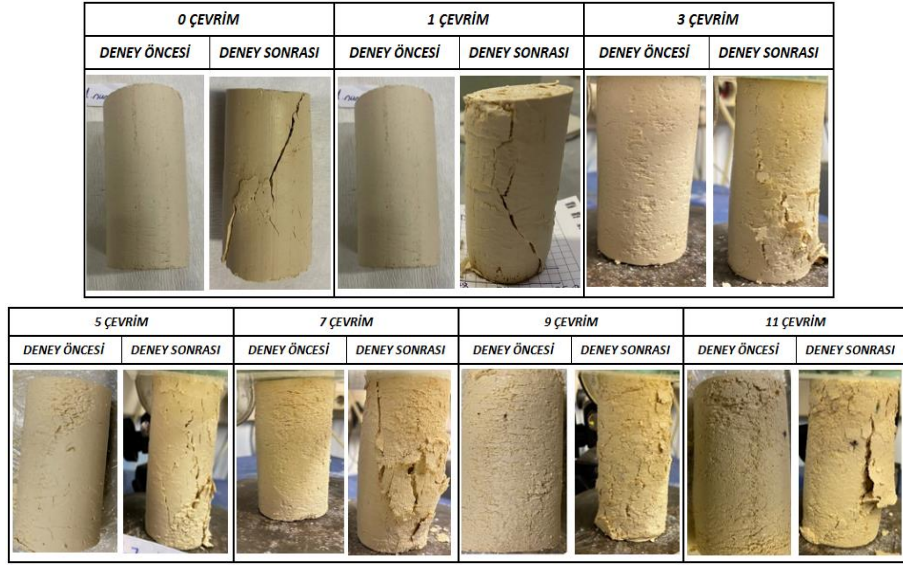
(Şekil 3.18). Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numuneleri ise hazırlandığı andan itibaren herhangi bir ortamda/desikatörde bekletilmeden Şekil 2.12’deki donma çözülme kabine yerleştirilmiştir.



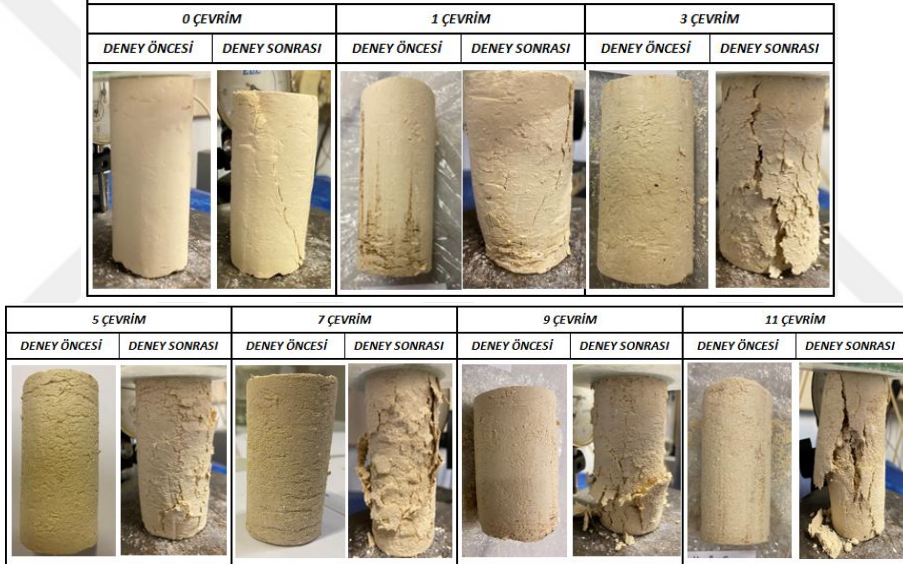
Şekil 3.18 Deney numunelerinin desikatörde bekletilmesi

Tüm deney numunelerinin kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra, serbest basınç deneyi öncesi ve serbest basınç deney sonrası görüntüleri çekilmiştir. Böylece, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numunelerinin kabinden önceki ve sonraki durumları gözlemlenerek, donma çözülme çevrimlerinin numune yüzeyinde yarattığı hasar derecesi de incelenmiştir. Donma çözülme çevrimlerinin numunenin iç yapısında meydana getirdiği hasar durumu ise Bölüm 5’te detaylı bir biçimde sunulmuştur. Ayrıca, donma çözülme çevrimlerine maruz kalıp kalmadığı fark etmeksizin deney numunelerinin yük altındaki kırılma düzlemleri gözlemlenmiştir.

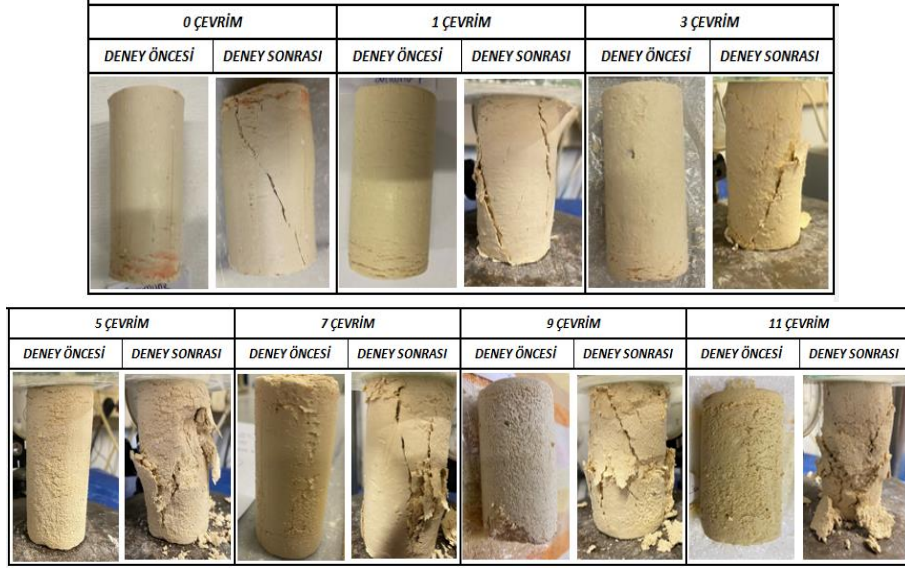
Katkılı (P5, P8, P10, P12) ve katkısız (P0) zeminin serbest basınç deney öncesi (donma çözülme kabine yerleştirilip ilgili çevrim sonunda kabinden alındıktan sonraki) ve serbest basınç deney sonrası görüntüleri her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.19 – Şekil 23’te sunulmuştur.



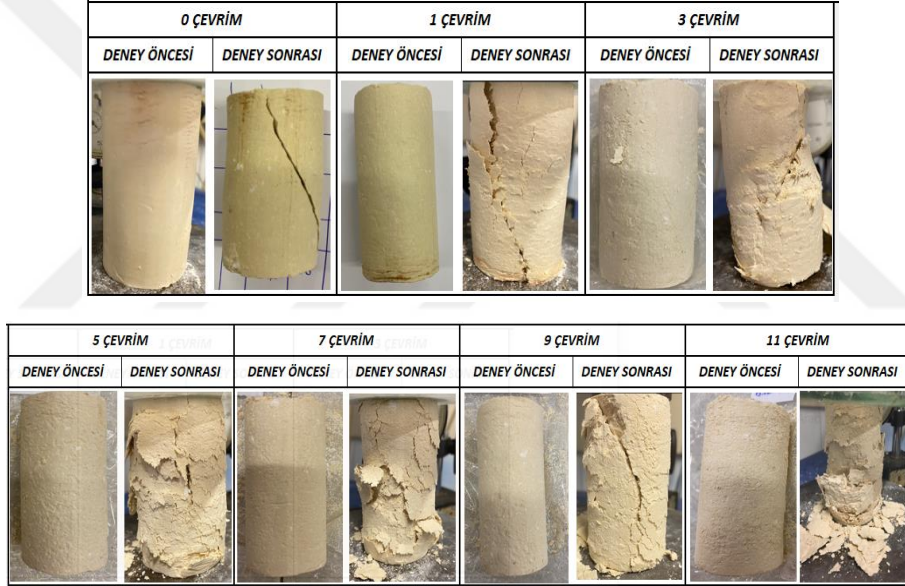
Şekil 3.19 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



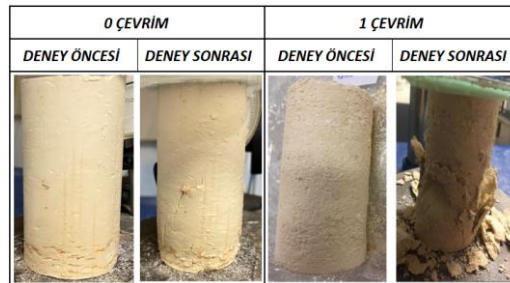
Şekil 3.20 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 3.21 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 3.22 P10 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 3.23 P12 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler

Şekil 3.19– Şekil 3.23’te verilen görüntülerde mFDM katkılı zeminin deney öncesi (donma çözülme çevrimlerinden sonra kabinden alınmasının akabinde) görüntülerinde, donma çözülme çevrimlerinin zemin yüzeyinde gözle görülebilir bir hasar bıraktığı, deney sonrası görüntüler de ise bu hasara bağlı olarak zeminin kırılma biçimlerinin değiştiği belirlenmiştir.

Serbest basınç deneyleri için kompaksiyon kalıbından numune alımı sırasında, %5, %8, %10 ve %12 oranlarında zemine ilave edilen mFDM’nin zeminle homojen bir karışım oluşturduğu Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



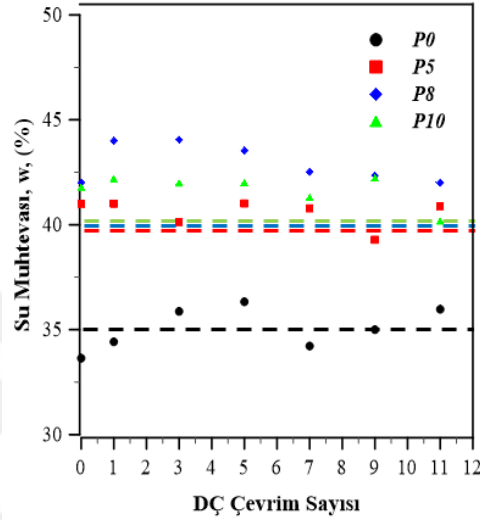
Şekil 3.24 mFDM-zemin homojen karışımı görüntüleri

Şekil 3.19-Şekil 3.23’te sunulan deney öncesi ve deney sonrası çekilen fotoğrafların yanı sıra, tüm deney numunelerinin kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra (serbest basınç deneyi öncesi) ve serbest basınç deney sonrası ağırlıkları tartılarak, donma çözülme çevrimlerinin zeminde dane kaybına sebep olup olmadığı incelenmiştir. Buna ilave olarak, ölçülen ağırlıklar ile su muhtevaları da kontrol edilmiş olup, hem hedeflenen su muhtevası değerine ulaşıp ulaşılmadığı hem de Şekil 2.9’daki gibi hazırlanan deney numunelerinin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevasını kaybedip kaybetmediği belirlenmiştir. Tablo 2.14’te yer alan su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin ölçülen su muhtevası değerleri ve dane kaybı miktarları Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri

<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>	<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>
P0-0	33,64	0,00	P5-0	41,00	0,00
P0-1	34,42	0,00	P5-1	41,00	0,30
P0-3	35,87	0,50*	P5-3	40,13	0,50
P0-5	36,33	0,70*	P5-5	41,01	0,90
P0-7	34,22	0,70	P5-7	40,78	1,80
P0-9	35,00	0,50	P5-9	39,29	1,00
P0-11	35,97	0,40	P5-11	40,88	0,60
<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr,</i>	<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr,</i>
P8-0	42,00	0,00	P10-0	41,79	0,00
P8-1	44,00	0,30	P10-1	42,18	0,40
P8-3	44,05	0,60	P10-3	41,99	0,70
P8-5	43,53	1,20	P10-5	41,30	1,20
P8-7	42,52	0,80	P10-7	42,23	1,40
P8-9	42,35	2,40	P10-9	40,18	2,20
P8-11	42,00	1,40	P10-11	40,63	2,60
*: ölçülen ağırlıkta artış					

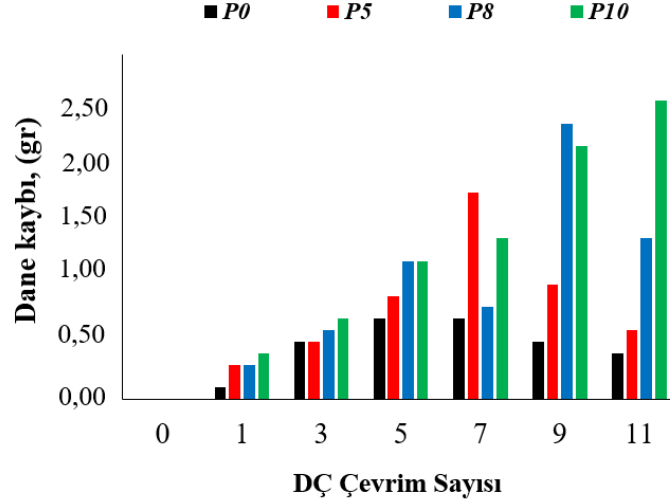
Tablo 2.14’ te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, deney başındaki (ilgili çevrimlerin ardından kabinden çıkarıldıktan sonraki) su muhtevası değerleri Tablo 3.2’de her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 3.25’te ise hedeflenen su muhtevası değeri ile ölçülen su muhtevası değerleri arasındaki fark sunulmuştur. Şekil 3.25’teki kesikli çizgiler numunelerin hazırlandığı su muhtevası değerlerini, semboller ise deney başı su muhtevası değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 3.25 Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri

Tablo 3.2 ve Şekil 3.25’te sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevası $\pm 1,50$ mertebesinde değişmiştir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevelerinde sırasıyla $+2,00$ $+5,00$ $\%3,00$ mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

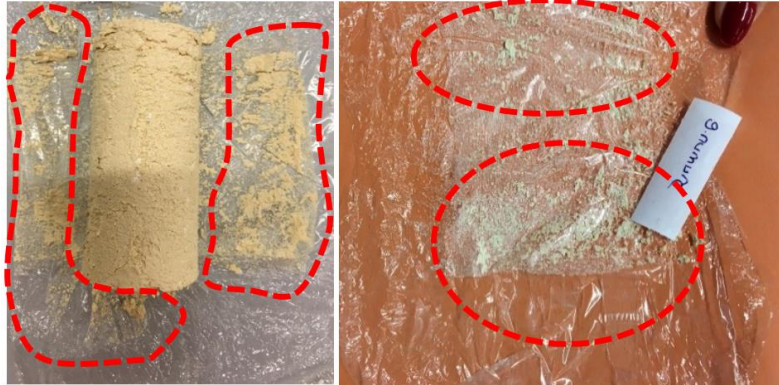
Tablo 2.14’te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, donma çözülme kabinine konulmadan önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülmüş, donma çözülme çevrimleri boyunca ağırlıklarında meydana gelen değişimler Tablo 3.2’de her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 3.26’da, meydana gelen numune kayıplarının donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak değişimi, katkı oranı da dikkate alınarak sunulmuştur.



Şekil 3.26 Dane kaybı-DÇ çevrim ilişkisi

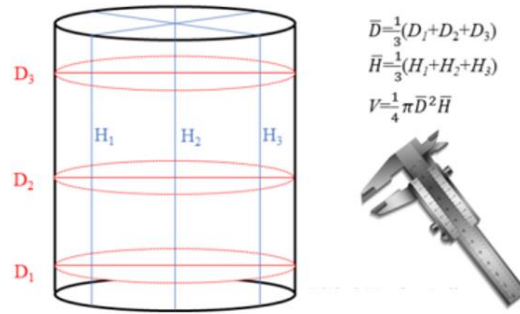
Tablo 3.2 ve Şekil 3.26’da sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminde, donma çözülme çevrimleri sonunda meydana gelen dane kaybı miktarı maks. $\pm 0,70$ gr mertebesindedir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminde ise donma çözülme çevrimleri sonunda dane miktarlarında sırasıyla maks. -1,80 gr, -2,40 gr, -2,60 gr mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan deney numuneleri kabinden alındıktan sonra dikkatli bir şekilde strech filmden ayrılmaktadır. Ancak, uzun DÇ çevrimleri sonunda strech film numuneye yapılaşabilir ya da numune sürekli donma çözülme çevrimleri sebebi ile yumuşama gösterebilmektedir. Şekil 3.26’da verilen malzeme kaybının sebebi Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Malzeme kaybı, numunenin strech filme yapışmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.27 Malzeme kaybı görseli

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan deney numunelerinin kabine konulmadan önceki ve kabinden alındıktan sonraki ağırlıkları, su muhtevaları ölçülmüş, donma çözülme çevrimlerinin zeminin su muhtevalarında ve ağırlığında meydana getirdiği etkiler belirlenmiştir. Bunların yanı sıra, donma çözülme çevrimlerinin deney numunesi üzerinde meydana getirdiği hasar da görsel olarak incelenmiş, her bir katkı oranı için ilgili görseller Şekil 3.19-Şekil 3.23'te sunulmuştur. Tüm bunlara ilave olarak, donma çözülme çevrimlerinin deney numunesinin hacminde meydana getirdiği etkiler de incelenmiştir. Bu amaçla, deney numunesinin kabine konulmadan önceki ve kabinden alındıktan sonraki boy ve çap değerleri ölçülerek hacim değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda, literatürde yer alan Lu vd. (2019)'un önermiş olduğu hacim değişim hesabı göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Hacim değişimi hesabı (Lu vd. (2019))

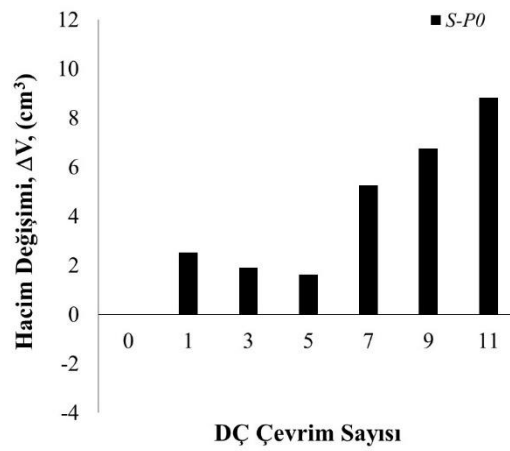
Lu vd. (2019)'un önermiş olduğu hacim değişim hesabında, numunenin çapı, yüksekliğin 1/3'ü boyunca 3 kez dijital kumpas ile ölçülmektedir. Numunenin yüksekliği de 3 farklı yerden ölçülmekte ve daha sonra ortalama değer alınmaktadır. Numune hacmi Şekil 3.28'deki formüle göre hesaplanmaktadır. Hacim değişimleri her bir numune için DÇ çevrimine maruz bırakılmadan önce ve DÇ çevrimine maruz bırakıldıktan sonra (kabine konulmadan önce ve ilgili DÇ çevriminin ardından kabinden alındıktan sonra) hesaplanan çap ve boy değerleri ile Lu vd. (2019)'un önerisine göre hesaplanmıştır. Yani, deney numunelerinin hazırlanmasının hemen ardından ölçülen 3 çap ve 3 boy değeri ile numunelerin donma çözülme kabinine konulup ilgili DÇ çevrimine maruz bırakıldıktan sonra kabinden alınmasının akabinde ölçülen 3 çap ve 3 boy değerleri kullanılmıştır. Kullanılan 6 çap ve 6 boy değeri ile hesaplanan ilk hacim ve son hacim değerleri ile hacim değişimleri elde edilmiştir.

Kabin öncesi ve kabin sonrası ölçülen çap ve boy değerleri ile Lu vd. (2019)'un önerdiği eşitlik kullanılarak her bir katkı oranı için hacim değişimleri (ΔV) hesap edilmiş ve Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.3 P0, P5, P8, P10 için hacim değişimleri

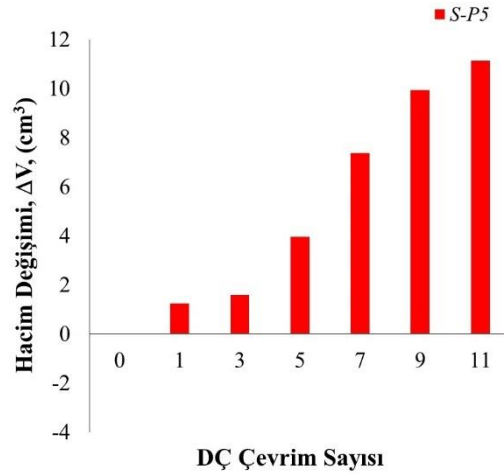
<i>ID</i>	ΔV (cm^3)	<i>ID</i>	ΔV (cm^3)	<i>ID</i>	ΔV (cm^3)	<i>ID</i>	ΔV (cm^3)
P0-0	0,00	P5-0	0,00	P8-0	0,00	P10-0	0,00
P0-1	2,53	P5-1	1,25	P8-1	-3,80	P10-1	2,62
P0-3	1,91	P5-3	1,58	P8-3	-2,75	P10-3	2,52
P0-5	1,62	P5-5	3,96	P8-5	3,88	P10-5	4,27
P0-7	5,27	P5-7	7,37	P8-7	3,95	P10-7	0,00
P0-9	6,76	P5-9	9,94	P8-9	8,90	P10-9	0,75
P0-11	8,81	P5-11	11,14	P8-11	6,55	P10-11	1,56

Tablo 3.3'te sunulan hacim değişimi, değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki P0 için Şekil 3.29'da, P5 için Şekil 3.30'da, P8 için Şekil 3.31'de, P10 için Şekil 3.32'de ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



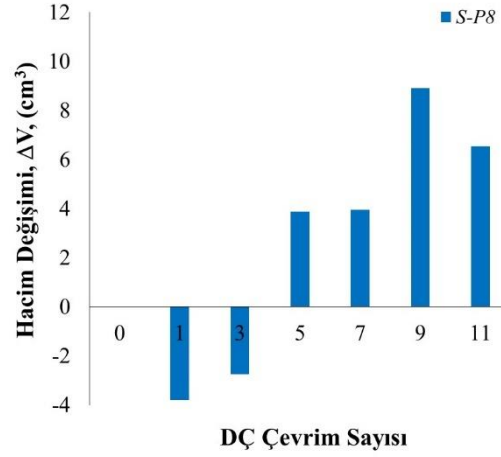
Şekil 3.29 P0 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.29 ve Tablo 3.3'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği, artan donma çözülme çevrim sayısı ile hacimdeki değişimin 5. çevrime kadar önce azaldığı, 7. çevrim itibariyle arttığı görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) katkısız zeminin ilk hacmine göre hesap edilen hacim değişimleri her bir çevrim (1, 3, 5, 7, 9, 11) için sırasıyla $2,53 \text{ cm}^3$, $1,91 \text{ cm}^3$, $1,62 \text{ cm}^3$, $5,27 \text{ cm}^3$, $6,76 \text{ cm}^3$, $8,81 \text{ cm}^3$ mertebesindedir.



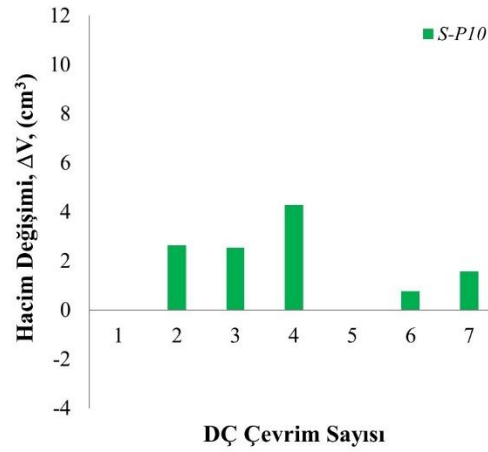
Şekil 3.30 P5 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.30 ve Tablo 3.3'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği, artan donma çözülme çevrim sayısı ile hacimdeki değişimin arttığı görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) %5 mFDM katkılı zeminin (P5) ilk hacmine göre hesap edilen hacim değişimleri her bir çevrim (1, 3, 5, 7, 9, 11) için sırasıyla $1,25 \text{ cm}^3$, $1,58 \text{ cm}^3$, $3,96 \text{ cm}^3$, $7,37 \text{ cm}^3$, $9,94 \text{ cm}^3$, $11,14 \text{ cm}^3$ mertebesindedir.



Şekil 3.31 P8 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.31 ve Tablo 3.3'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği, artan donma çözülme çevrim sayısı ile hacimdeki değişimin farklı seyrettiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) %8 mFDM katkılı zeminin (P8) ilk hacmine göre hesap edilen hacim değişimleri her bir çevrim (1, 3, 5, 7, 9, 11) için sırasıyla 0,30 cm³, 0,60 cm³, 1,20 cm³, 0,80 cm³, 2,40 cm³, 1,40 cm³ mertebesinde dir.



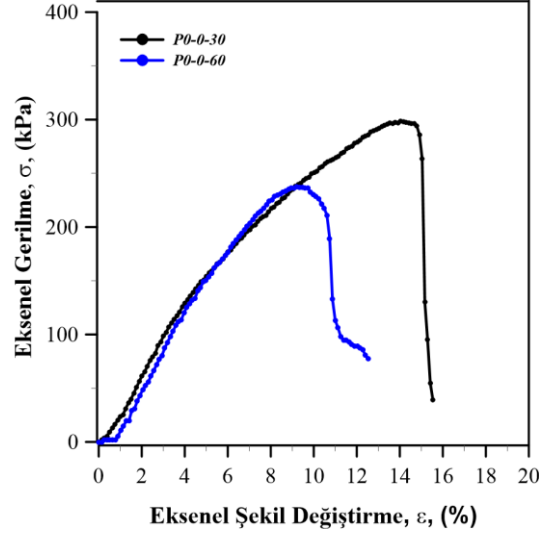
Şekil 3.32 P10 için ΔV -DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 3.32 ve Tablo 3.3'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği, artan donma çözülme çevrim sayısı ile hacimdeki değişimin farklı seyrettiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) %10 mFDM katkılı zeminin (P10) ilk hacmine göre hesap edilen hacim değişimleri her bir çevrim (1, 3, 5, 7, 9, 11) için sırasıyla 2,62 cm³, 2,52 cm³, 4,27 cm³, 0 cm³, 0,75 cm³, 1,46 cm³ mertebesindeir.

Yapılan serbest basınç deneylerinde kullanılan numunelerin hepsi aynı numune hazırlama yöntemi ile hazırlanmış, 0, 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 kez olacak şekilde donma çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Şekil 2.13'te de sunulduğu üzere 1 çevrim 2 gün sürmüş, yapılan en uzun çevrim (11 çevrim) 22 günde tamamlanmıştır. Deney numunelerinin bu şartlardaki (kısa süreli) serbest basınç mukavemeti, hacim değişimi davranışı detaylı bir biçimde belirlenmiştir. Bunların haricinde, uzun sürede ve daha farklı koşullarda bekletilen mFDM katkılı zeminin de serbest basınç ve hacim değişimi davranışı yapılan deneylere ek olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, mFDM katkılı ve katkısız deney numuneleri 3 grupta deneye tabi tutulmuştur. 1. grup numuneler en uzun donma çözülme çevrimi olan 11 çevrime maruz bırakılmış, ardından 30 gün desikatörde bekletilerek serbest basınç mukavemeti (q_u) ölçülmüştür. 2. ve 3. grup numuneler, üzerinde donma çözülme çevrimi uygulanmadan ilgili optimum su muhtevasında hazırlanarak 30 gün ve 60 gün boyunca desikatörde bekletilmiş ve ardından serbest basınç deneyi yapılmıştır.

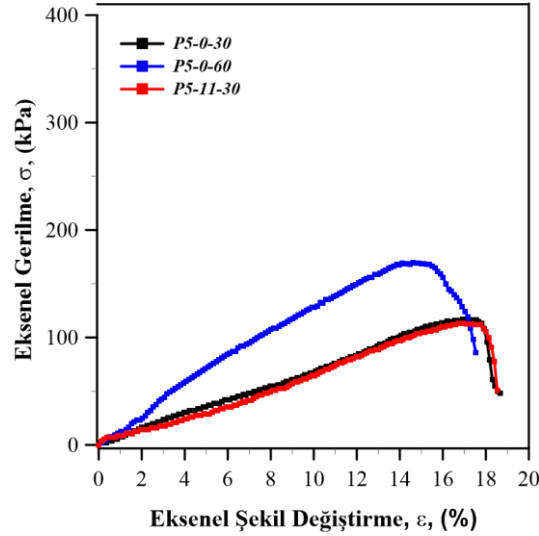
- 1. grup numuneler; P(0, 5, 8, 10% mFDM)-11-30,
- 2. grup numuneler; P(0, 5, 8, 10 %mFDM)-0-30,
- 3. grup numuneler; P(0, 5, 8, 10 %mFDM)-0-60 şeklinde isimlendirilmiştir.

İlk terim, mFDM oranını, ikinci terim çevrim sayısını, üçüncü terim ise desikatörde bekleme süresini ifade etmektedir. Buna göre; "P8-11-30", %8 mFDM katkılı deney numunesinin 11 donma çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra desikatörde 30 gün beklemesini ifade etmektedir. Elde edilen serbest basınç deney sonuçları P0 için Şekil 3.33'te, P5 için Şekil 3.34'te, P8 için Şekil 3.35'te ve P10 için Şekil 3.36'da ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



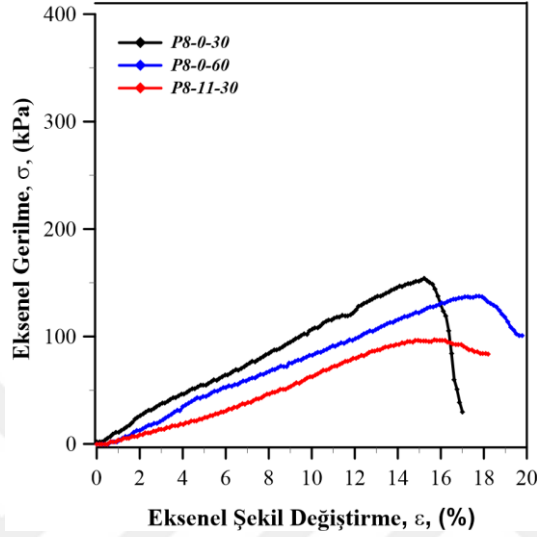
Şekil 3.33 P0 için q_u - ϵ ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.33'te verilen katkısız (P0) zeminin uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, desikatörde bekletilme süresinin uzaması mukavemette kayıp meydana getirmiştir. Zeminin 30 ve 60 gün desikatörde bekletilmesi ile elde edilen mukavemet değerleri sırasıyla 298 kPa, 237 kPa'dır. 11 çevrime maruz bırakılan ve ardından 30 gün desikatörde bekletilen P0, deneye tabi tutulmadan önce stretch filminden çıkarıldığı anda kendini tutamayacak kadar zayıflamış ve kırılmıştır. Alınan 3 deney numunesi için de aynı problem ile karşılaşmıştır. Bu sebepten, P0-11-30 numunesi üzerinde serbest basınç deneyi gerçekleştirilememiştir.



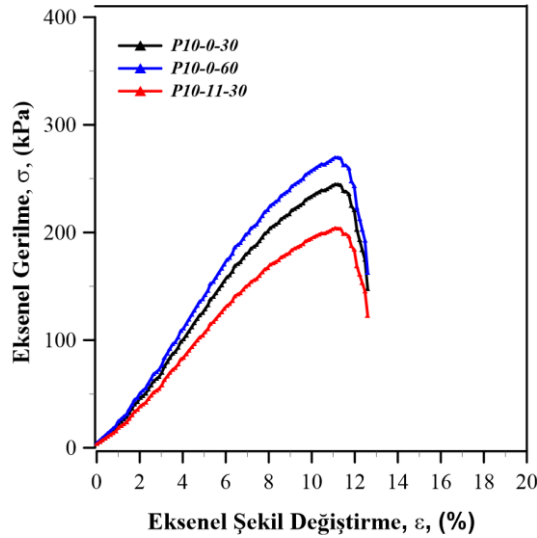
Şekil 3.34 P5 için q_u - ϵ ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.34'te verilen %5 mFDM katkılı (P5) zeminin uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, desikatörde bekletilme süresinin uzaması mukavemette artış meydana getirmiştir. Zeminin 30 ve 60 gün desikatörde bekletilmesi ile elde edilen mukavemet değerleri sırasıyla 117 kPa, 169 kPa'dır. P5-11-30 numunesinin mukavemet değeri P5-0-30 ile aynı olup 113 kPa'dır.



Şekil 3.35 P8 için q_u - ϵ ilişkisi (uzun süreli koşullar)

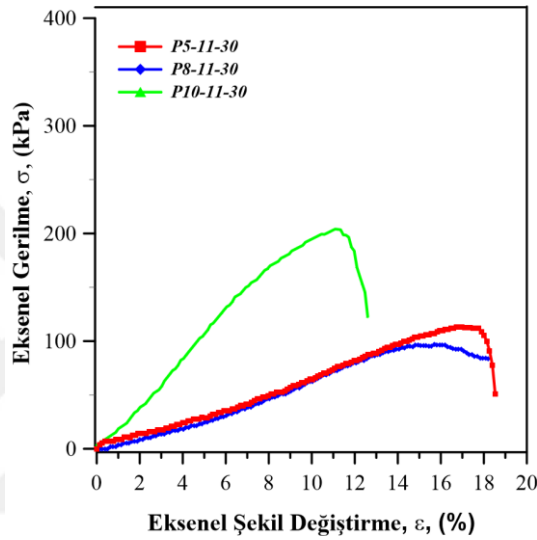
Şekil 3.35'te verilen %8 mFDM katkılı (P8) zeminin uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, desikatörde bekletilme süresinin uzaması mukavemette kayıp meydana getirmiştir. Zeminin 30 ve 60 gün desikatörde bekletilmesi ile elde edilen mukavemet değerleri sırasıyla 154 kPa, 137 kPa'dır. P8-11-30 numunesinin mukavemet değeri ise 96 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.36 P10 için q_u - ϵ ilişkisi (uzun süreli koşullar)

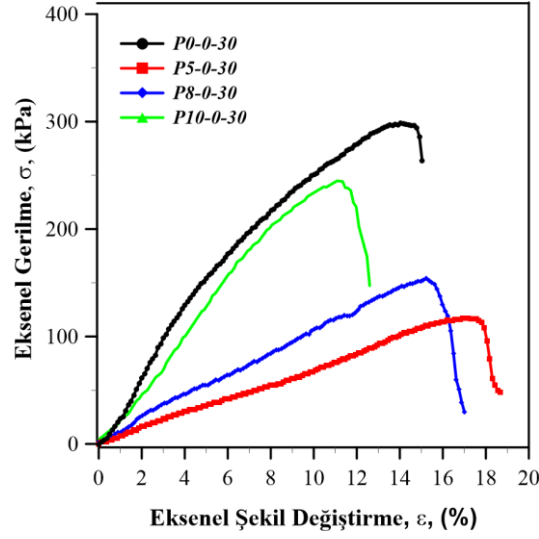
Şekil 3.36’da verilen %10 mFDM katkılı (P10) zeminin uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, desikatörde bekletilme süresinin uzaması mukavemette artış meydana getirmiştir. Zeminin 30 ve 60 gün desikatörde bekletilmesi ile elde edilen mukavemet değerleri sırasıyla 245 kPa, 270 kPa’dır. 1P10-11-30 numunesinin mukavemet değeri ise 205 kPa olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.33-Şekil 3.36’da sunulan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri 1. grup numuneler için Şekil 3.37’de, 2. grup numuneler için Şekil 3.38’de, 3. grup numuneler için Şekil 3.39’da bir arada olacak şekilde sunulmuştur.



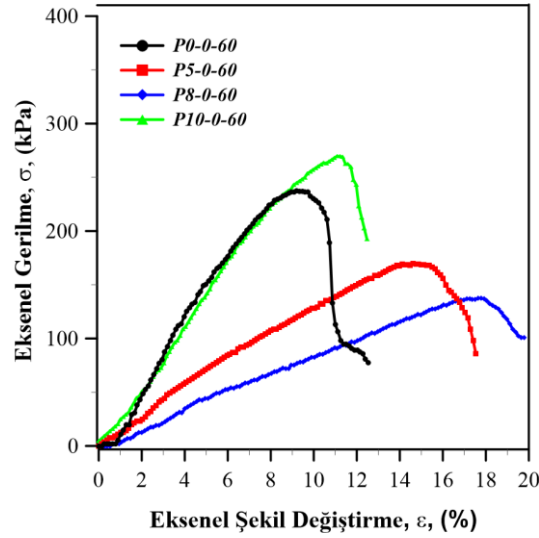
Şekil 3.37 1. grup için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.37’de verilen uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, donma çözülme çevrimine maruz kalan ve ardından 30 gün boyunca desikatörde bekletilen P5-11-30, P8-11-30 ve P10-11-30 numuneleri kendi arasında kıyaslandığında, P5-11-30 ve P8-11-30’un mukavemet değerlerinin hemen hemen aynı (113 kPa ve 96 kPa) olduğu, ancak P10-11-30’un mukavemet değerinin yaklaşık 2 kat (205 kPa) kadar daha büyük olduğu elde edilmiştir. Şekil 3.33’te de açıklandığı üzere numune alınamamasından dolayı P0-11-30 üzerinde deney yapılamamıştır.



Şekil 3.38 2. grup için q_u - ϵ ilişkisi

Şekil 3.38’de verilen uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, donma çözülme çevrimi uygulanmadan 30 gün boyunca desikatörde bekletilen P0-0-30, P5-0-30, P8-0-30 ve P10-0-30 numuneleri kendi arasında kıyaslandığında, P5-0-30 ve P8-0-30’un mukavemet değerlerinin birbirine yakın olduğu (117 kPa ve 154 kPa) olduğu, ancak P10-0-30’un mukavemet değerinin yaklaşık 2 kat (245 kPa) kadar daha büyük elde edilmiştir. P0-0-30’un mukavemet değeri ise 298 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.39 3. grup için q_u - ϵ ilişkisi

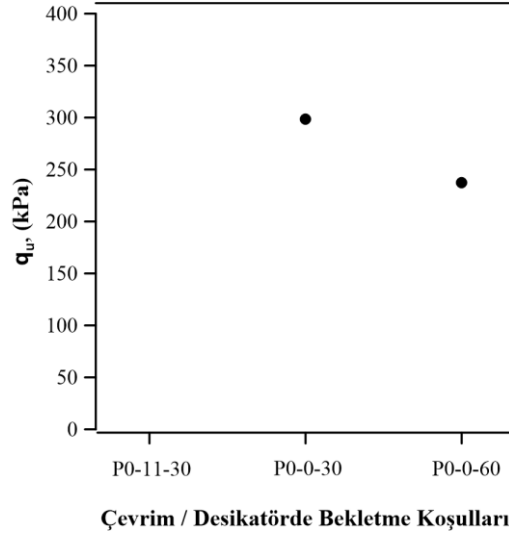
Şekil 3.39’da verilen uzun süreli serbest basınç deney sonuçlarına göre, donma çözülme çevrimi uygulanmadan 60 gün boyunca desikatörde bekletilen P0-0-60, P5-0-60, P8-0-60 ve P10-0-60 numuneleri kendi arasında kıyaslandığında, P5-0-60 ve P8-0-60’ın mukavemet değerlerinin birbirine yakın olduğu (169 kPa ve 137 kPa) olduğu, ancak P10-0-60’ın mukavemet değerinin yaklaşık 2 kat (270 kPa) kadar daha büyük olduğu elde edilmiştir. P0-0-60’ın mukavemet değeri ise 237 kPa olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.36-Şekil 3.39’da sunulan şekil değiştirme-gerilme ilişkilerinden elde edilen q_u (kPa) ve maksimum şekil değiştirme ($\epsilon_{göçme}$) değerleri Tablo 3.4’te sunulmuştur.

Tablo 3.4 P0, P5, P8 ve P10 q_u - ϵ_{max} değerleri (uzun süreli koşullar)

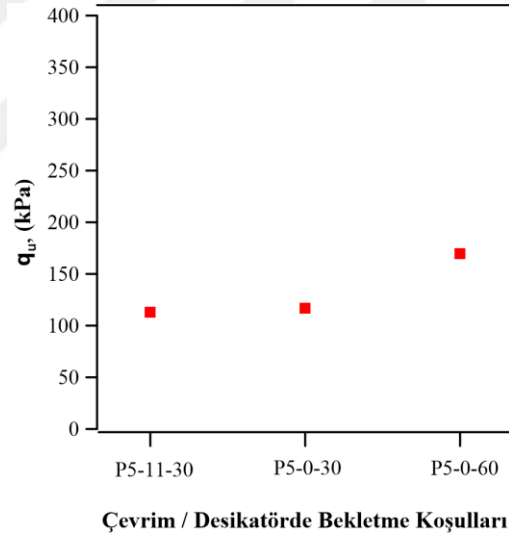
<i>ID</i>	<i>ϵ_{max}</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)	<i>ID</i>	<i>ϵ_{max}</i> (%)	<i>q_u</i> (kPa)
P0-0-30	14,04	298	P8-0-30	15,23	154
P0-0-60	9,21	237	P8-0-60	17,65	137
P0-11-30	-	-	P8-11-30	15,69	96
P5-0-30	16,73	117	P10-0-30	11,10	245
P5-0-60	14,62	169	P10-0-60	11,09	270
P5-11-30	16,73	113	P10-11-30	10,80	205

Uzun süreli bekletilen numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen ve Tablo 3.4’te sunulan q_u değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki, P0 için Şekil 3.40’da, P5 için Şekil 3.41’de, P8 için Şekil 3.42’de, P10 için Şekil 3.43’te ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



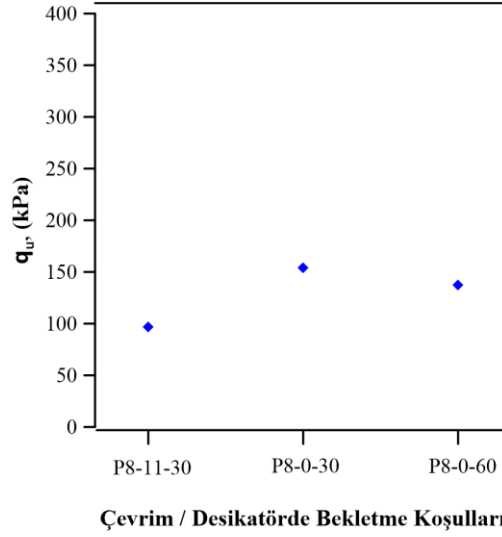
Şekil 3.40 P0 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.40 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, P0 zeminin desikatörde bekletildiği durumdaki uzun süreli serbest basınç mukavemetinin 298 kPa-237 kPa kadar dar bir aralıkta değiştiği görülmüştür.



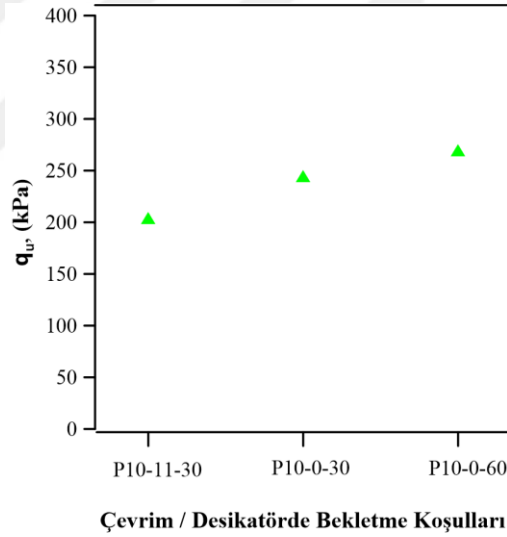
Şekil 3.41 P5 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.41 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, P5 zeminin uzun süreli serbest basınç mukavemetinin 113 kPa-117 kPa-169 kPa kadar dar bir aralıkta değiştirdiği görülmüştür.



Şekil 3.42 P8 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

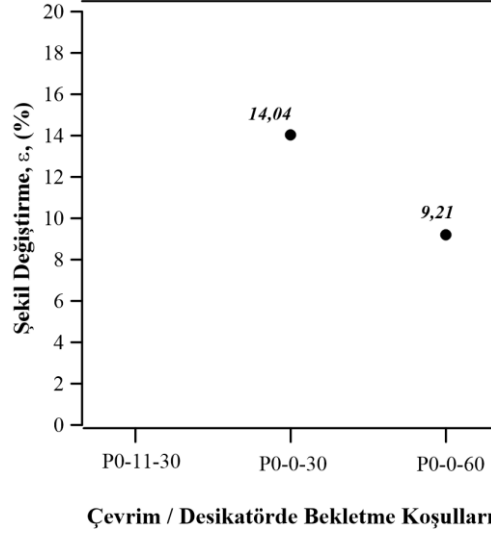
Şekil 3.42 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, P8 zeminin uzun süreli serbest basınç mukavemetinin 154 kPa-137 kPa-96 kPa kadar dar bir aralıkta değiştiği görülmüştür.



Şekil 3.43 P10 için q_u -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

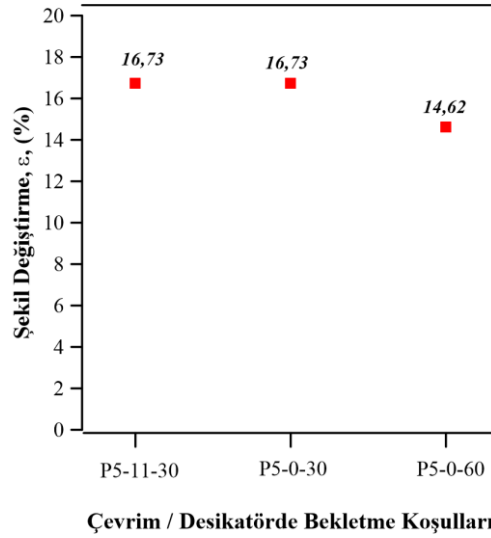
Şekil 3.43 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, P10 zeminin uzun süreli serbest basınç mukavemetinin 244 kPa-279 kPa-204 kPa kadar dar bir aralıkta değiştiği görülmüştür.

Benzer şekilde, Tablo 3.4'te sunulan ε_{max} . ($\varepsilon_{göçme}$) değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki, P0 için Şekil 3.44'te, P5 için Şekil 3.45'te, P8 için Şekil 3.46'da, P10 için Şekil 3.47'de ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



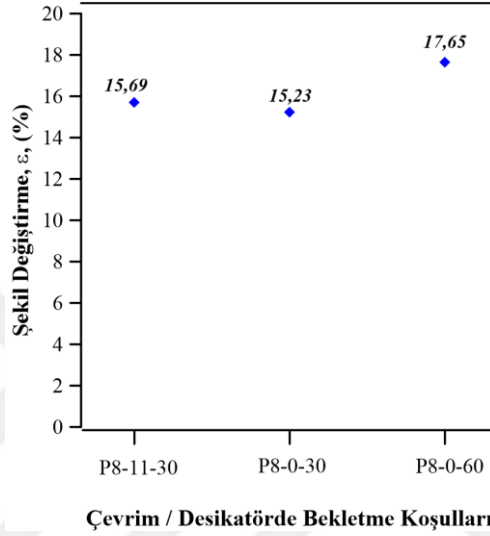
Şekil 3.44 P0 için $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.44 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız zeminin (P0) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %14,04, %9,21 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi desikatörde bekletilme süresinin artması ile azalma göstermiştir.



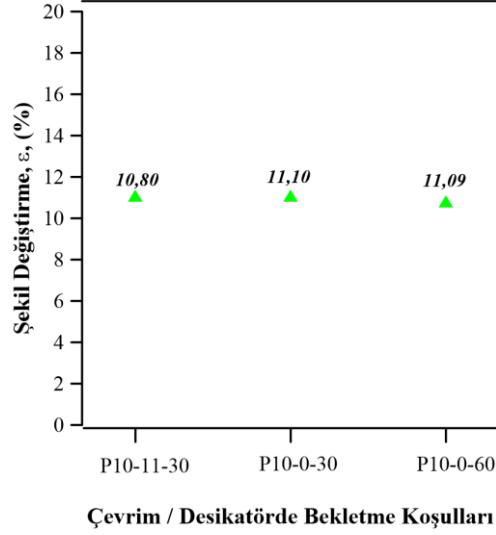
Şekil 3.45 P5 için $\epsilon_{göçme}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.45 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız zeminin (P0) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %16,73, %16,73 ve %14,62 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi desikatörde bekletilme süresinin artması ile azalma göstermiştir. P5-11-30 ve P5-0-30 numunelerinin göçme şekil değiştirmesi değerleri aynıdır.



Şekil 3.46 P8 için $\epsilon_{\text{göçme}}$ -DÇ çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.46 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız zeminin (P0) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %15,69, %15,23 ve %17,65 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi desikatörde bekletilme süresinin artması ile artış göstermiştir.

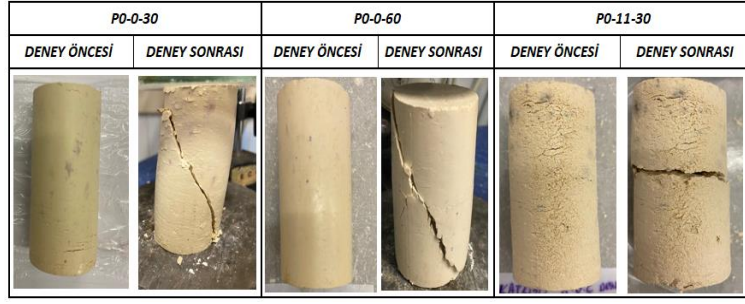


Şekil 3.47 P10 için $\varepsilon_{göçme}$ -DC çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

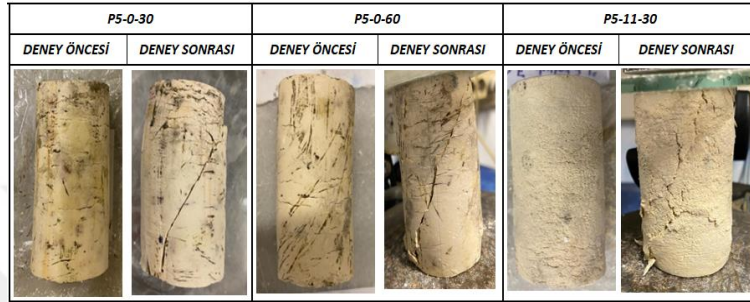
Şekil 3.47 ve Tablo 3.4'te sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin göçme şekil değiştirmesinde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkısız zeminin (P0) göçme şekil değiştirmesi sırasıyla %10,80, %11,10 ve %11,09 mertebelerinde meydana gelmiştir. Göçme şekil değiştirmesi değeri, tüm deney koşulları için birbirine oldukça yakın değer göstermiştir.

Şekil 3.44-Şekil 3.47'de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışında ve zeminin göçme şekil değiştirmesi değerinde değişikliğe sebep verdiği görülmüştür.

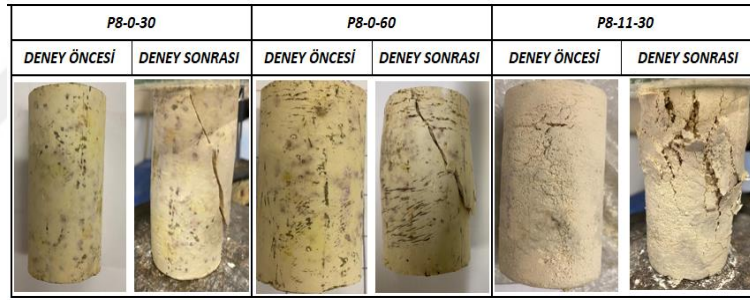
Katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminin serbest basınç deney öncesi (donma çözülme kabineye yerleştirilip ilgili çevrim sonunda kabinden alındıktan sonraki) ve serbest basınç deney sonrası görüntüleri her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.48 – Şekil 3.51'de sunulmuştur.



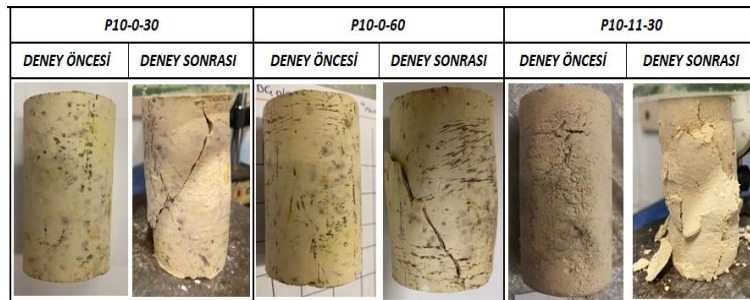
Şekil 3.48 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)



Şekil 3.49 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)



Şekil 3.50 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)



Şekil 3.51 P10 deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (uzun süreli koşullar)

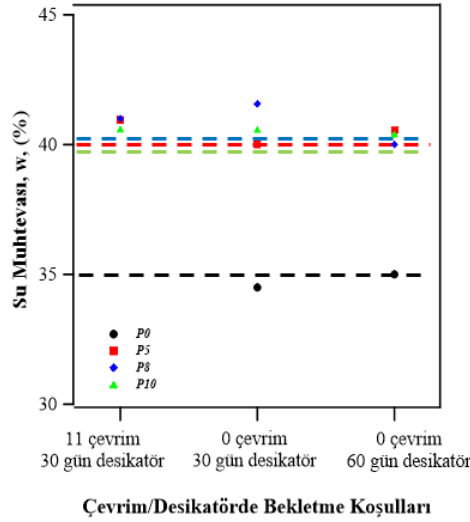
Şekil 3.48– Şekil 3.51’de verilen görüntülerde mFDM katkılı zeminin deney öncesi (donma çözülme çevrimlerinden sonra kabinden alınmasının akabinde) görüntülerinde, donma çözülme çevrimleri ve desikatörde bekletme sürelerinin zeminin yüzeyinde gözle görülebilir bir değişiklik meydana getirdiği, zemin yüzeyinde hasar bıraktığı, deney sonrası görüntüler de ise bu hasara bağlı olarak zeminin kırılma biçimlerinin değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 3.48-Şekil 3.51’de sunulan deney öncesi ve deney sonrası çekilen fotoğrafların yanı sıra, tüm deney numunelerinin kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra (serbest basınç deneyi öncesi) ve serbest basınç deney sonrası ağırlıkları tartılarak, donma çözülme çevrimlerinin zeminde dane kaybına sebep olup olmadığı incelenmiştir. Buna ilave olarak, ölçülen ağırlıklar ile su muhtevaları da kontrol edilmiş olup, hem hedeflenen su muhtevası değerine ulaşıp ulaşılmadığı hem de Şekil 2.9’daki gibi hazırlanan deney numunelerinin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevasını kaybedip kaybetmediği belirlenmiştir. Tablo 2.14’te yer alan su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin ölçülen su muhtevası değerleri ve dane kaybı miktarları Tablo 3.5’te sunulmuştur.

Tablo 3.5 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri-uzun süreli koşullar

<i>ID</i>	<i>w,</i> (%)	<i>gr</i>	<i>ID</i>	<i>w,</i> (%)	<i>gr</i>
<i>P0-0-30</i>	34,50	0,30	<i>P8-0-30</i>	41,57	0,40
<i>P0-0-60</i>	35,00	0,30	<i>P8-0-60</i>	40,00	0,20
<i>P0-11-30</i>	-	-	<i>P8-11-30</i>	41,00	1,20
<i>P5-0-30</i>	40,00	0,00	<i>P10-0-30</i>	40,58	0,80
<i>P5-0-60</i>	40,55	0,20	<i>P10-0-60</i>	40,59	2,50
<i>P5-11-30</i>	40,94	1,50	<i>P10-11-30</i>	40,40	0,90

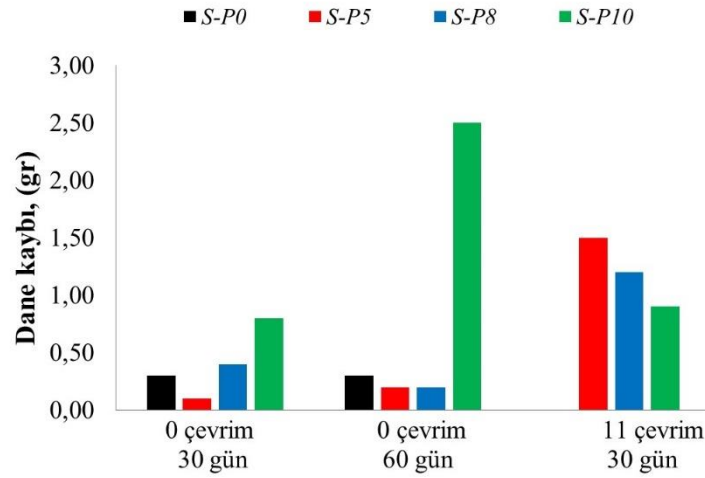
Tablo 2.14’te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, deney başındaki (ilgili çevrimlerin ardından kabinden çıkarıldıktan sonraki) su muhtevası değerleri Tablo 3.5’te her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 3.52’de ise hedeflenen su muhtevası değeri ile ölçülen su muhtevası değerleri arasındaki fark sunulmuştur. Şekil 3.52’deki kesikli çizgiler numunelerin hazırlandığı su muhtevası değerlerini, semboller ise deney başı su muhtevası değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 3.52 Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri (uzun süreli koşullar)

Tablo 3.5 ve Şekil 3.52’de sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminin uygulanan koşullar sonunda su muhtevası $\pm 0,50$ mertebesinde değişmiştir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminin koşullar sonunda su muhtevalarında sırasıyla $+1,00$ $+1,50$ $\pm 0,50$ mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

Tablo 2.14’te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, donma çözülme kabine konulmadan önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülmüş, donma çözülme çevrimleri boyunca ağırlıklarında meydana gelen değişimler Tablo 3.5’te her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 3.53’te, meydana gelen numune kayıplarının donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak değişimi, katkı oranı da dikkate alınarak sunulmuştur.



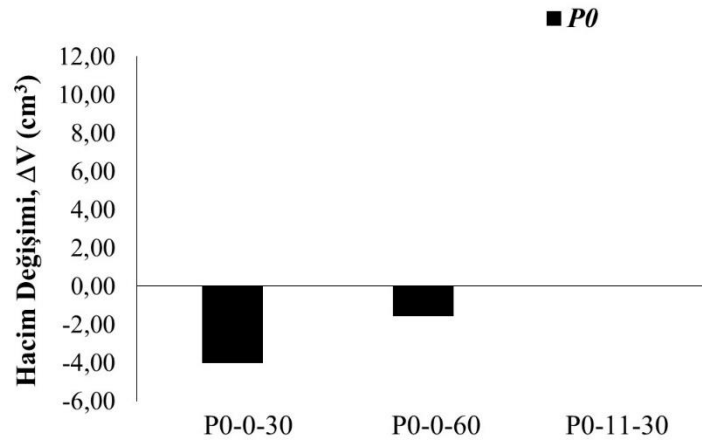
Şekil 3.53 Dane kaybı miktarı-DC çevrim ilişkisi (uzun süreli koşullar)

Tablo 3.5 ve Şekil 3.53'te sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminde, uzun bekleme koşulları sonunda meydana gelen dane kaybı miktarı -0,40 gr mertebesindedir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminde ise donma çözülme çevrimleri sonunda dane miktarlarında sırasıyla -1,50 gr, -1,20 gr, -2,50 gr mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

Kabin öncesi ve kabin sonrası ölçülen çap ve boy değerleri ile Lu vd. (2019)'un önerdiği eşitlik kullanılarak her bir katkı oranı için hacim değişimleri hesap edilmiş ve Tablo 3.6'da sunulmuştur. Tablo 3.6'da sunulan hacim değişimi, değerleri ile 1., 2. ve 3. grup deney numuneleri arasındaki ilişki P0 için Şekil 3.54'te, P5 için Şekil 3.55'te, P8 için Şekil 3.56'da, P10 için Şekil 3.57'de sunulmuştur.

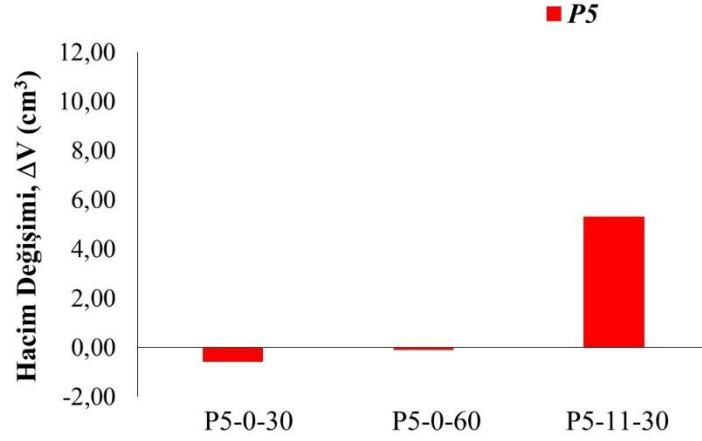
Tablo 3.6 P0, P5, P8, P10 için hacim değişimleri (uzun süreli koşullar)

<i>ID</i>	ΔV (cm^3)	<i>ID</i>	ΔV (cm^3)
<i>P0-0-30</i>	-4,00	<i>P8-0-30</i>	-2,93
<i>P0-0-60</i>	-1,54	<i>P8-0-60</i>	0,36
<i>P0-11-30</i>	-	<i>P8-11-30</i>	10,57
<i>P5-0-30</i>	-0,58	<i>P10-0-30</i>	0,90
<i>P5-0-60</i>	-0,09	<i>P10-0-60</i>	-1,69
<i>P5-11-30</i>	5,32	<i>P10-11-30</i>	1,60



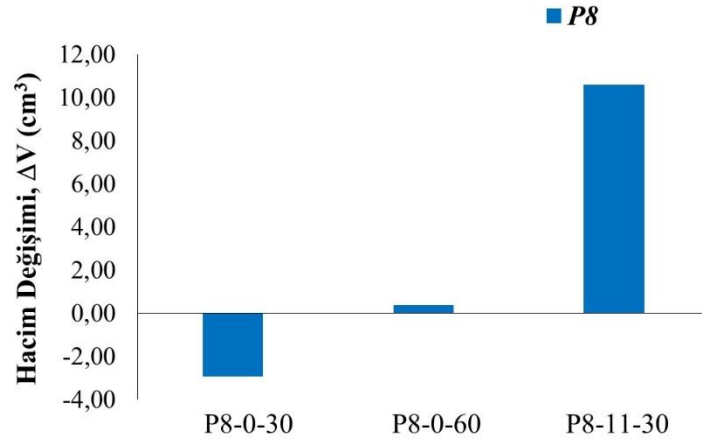
Şekil 3.54 P0 için ΔV (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.54 ve Tablo 3.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği görülmektedir. Desikatörde bekleme süresinin uzaması ile hacim değişiminde azalma meydana gelmiştir. P0-0-30 ve P0-0-60’ın hacim değişimleri sırasıyla 4,00 cm^3 ve 1,54 cm^3 mertebesinde.



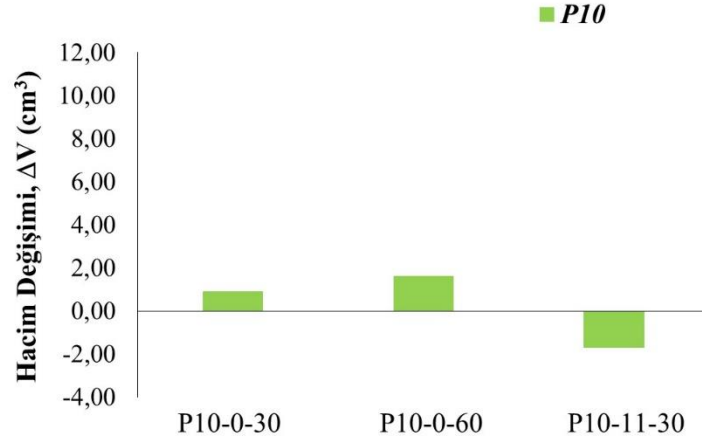
Şekil 3.55 P5 için ΔV (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.55 ve Tablo 3.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği görülmektedir. Desikatörde bekleme süresinin uzaması ile hacim değişiminde azalma meydana gelmiştir. P5-0-30 ve P5-0-60’ın hacim değişimleri sırasıyla 0,58 cm³ ve 0,09 cm³ mertebesindedir. P5-11-30’un hacim değişimi ise 5,32 cm³’tür.



Şekil 3.56 P8 için ΔV (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.56 ve Tablo 3.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği görülmektedir. P8-0-30 ve P8-0-60’ın hacim değişimleri sırasıyla 2,93 cm³ ve 0,36 cm³ mertebesindedir. P8-11-30’un hacim değişimi ise 10,57 cm³’tür.



Şekil 3.57 P10 için ΔV (uzun süreli koşullar)

Şekil 3.57 ve Tablo 3.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği görülmektedir. P10-0-30 ve P10-0-60’ın hacim değişimleri sırasıyla 0,90 cm³ ve 1,69 cm³ mertebesinde dir. P10-11-30’un hacim değişimi ise 1,60 cm³’tür.

Şekil 3.54-Şekil 3.57 ve Tablo 3.6’da sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, desikatörde bekletmenin zeminin hacminde değişim meydana getirdiği tespit edilmiştir.

4

SIKIŞABİLİRLİK ve HİDROLİK İLETKENLİK DAVRANIŞI

4.1 Tek Boyutlu Ödometre Deneyleri

%5, %8, %10 ve %12 oranlarında zemine ilave edilen mFDM'nin, Atterberg limitleri ve kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değeri) üzerindeki etkileri 2. Bölümde belirlenmiştir. Yapılan bu deneyler ile mFDM katkılı zemin karışımlarının davranışı donma çözülme çevrimleri olmadan incelenmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının mukavemet davranışı ise laboratuvarında yapılan serbest basınç deneyleri ile incelenmiş ve detaylı bir şekilde 3. Bölümde sunulmuştur.

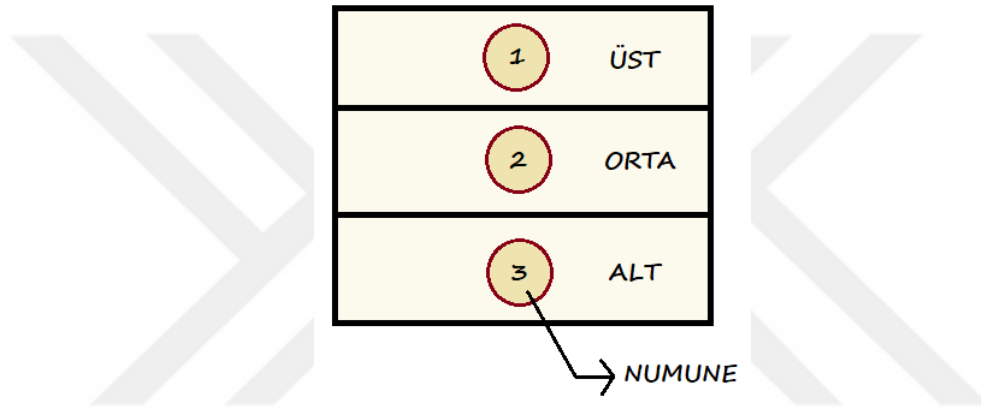
Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının oturma davranışı ise laboratuvarında yapılan tek boyutlu ödometre deneyleri ile incelenmiştir. Bu amaçla, Tablo 2.3'te belirtilen 2. prosedür baz alınmış, her bir karışım Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te belirlenen optimum su muhtevası değerinde ve standart kompaksiyon enerjisinde Şekil 2.9'daki gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan, Şekil 4.1'de sunulan 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğindeki konsolidasyon ringleri kullanılarak deney numuneleri alınmıştır.



Şekil 4.1 Tek boyutlu ödometre deney ringi

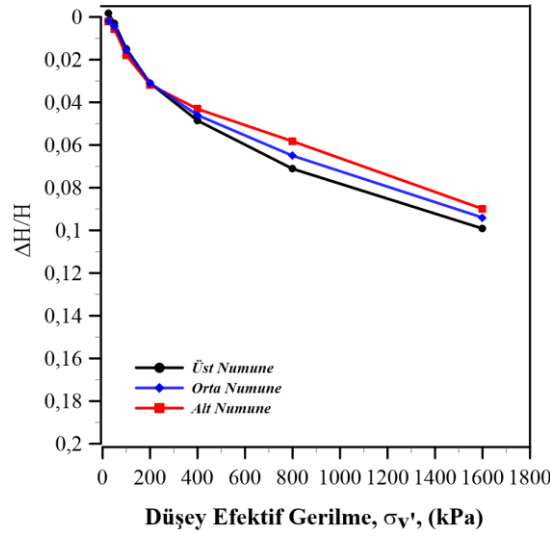
Bu tez çalışması kapsamında izlenen deneysel çalışmalarda uygulanan kompaksiyon enerjisi ve su muhtevası için, ön deneyler yapılmış ve sonuçları detaylı bir biçimde Bölüm 2'de sunulmuştur. Yapılan ön deneylerde serbest basınç deney numuneleri üzerinde 2 farklı kompaksiyon enerjisi ve üç farklı su muhtevası

değeri uygulanarak en olumsuz koşulu temsil eden parametreler (enerji ve su muhtevası) belirlenmiştir. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan deney numuneleri üzerinde yapılan ön deneyler sonunda, deney numunelerinin standart kompaksiyon enerjisinde ve optimum su muhtevasında hazırlanması gerektiğine karar verilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 4.2'deki gibi farklı tabakalardan alınan deney numuneleri üzerinde de ön deneyler yapılmış ve alt, orta, üst tabakadan alınan deney numunelerinin oturma değerleri incelenmiştir. Bunun amacı; alt, orta ve üst tabakada bulunan numunelerin aynı enerjide sıkıştırılmış olması halinde dahi farklı oturma değerleri gösterip göstermeyeceğinin belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlara göre kompaksiyon kalıbından numune alma yöntemine karar verilmiştir.



Şekil 4.2 Tek boyutlu ödometre deneyleri için numune alımı

Bu amaçla, optimum su muhtevası değerinde standart kompaksiyon enerjisi ile hazırlanan ve örnek temsil etmesi açısından sadece 3 donma çözülme çevrimine maruz bırakılan katkısız zemin (P0) üzerinde tek boyutlu ödometre deneyi yapılmıştır. Üç farklı tabakadan (alt, üst, orta) alınan deney numuneleri üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden elde edilen $\Delta H/H$ ve düşey efektif gerilme (σ_v') ilişkisi Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3 P0 için $\Delta H/H$ - σ_v' ilişkisi (ön deneyler)

Şekil 4.3'te sunulan $\Delta H/H$ ve düşey efektif gerilme (σ_v') ilişkisine göre, 3 tabakadan da alınan deney numunelerinin oturma değerleri 25 kPa-400 kPa arasındaki gerilme değerleri için aynıdır. 400 kPa-1600 kPa arasındaki gerilme değerleri için de oturma değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna göre, bir kompaksiyon kalıbının her bir tabakasından numune alınması sonuçları etkilememiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, aynı kompaksiyon kalıbının farklı tabakalarından alınan deney numuneleri üzerinde farklı donma çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Bu durum, hem zaman açısından, hem de ekonomi (kullanılan zemin ve katkı malzemesinin ziyan edilmemesi) açısından oldukça önem arz etmektedir.

Yapılan ön deneme deneylerinin ardından, Tablo 2.3'teki numune hazırlama prosedürüne göre hazırlanan deney numuneleri, su muhtevasını kaybetmeyecek bir biçimde ve ne çok sıkı ne de çok gevşek olmayacak şekilde stretch filme sarılmış ve ilgili koşul (su muhtevası, kompaksiyon enerjisi, donma çözülme çevrim sayısı ve alındığı kompaksiyon tabakası (alt, orta, üst)) için isimlendirilmiş, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmak üzere Şekil 2.12'deki donma çözülme kabineye yerleştirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Tek boyutlu ödometre deneyleri için deney numuneleri

Belirtilen prosedürlere uygun olarak hazırlanan deney numuneleri üzerinde donma çözülme çevrimi uygulanarak/uygulanmadan tek boyutlu ödometre deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme çevrimleri uygulamadan katkısız (%0 mFDM-P0) ve katkılı (5, 8, 10 mFDM- P5, P8, P10) numuneler üzerinde yapılan deneyler sonuçları referans deneyler olarak kabul edilmiştir. Aynı prosedürde hazırlanan katkısız ve katkılı numunelerin 1, 3, 5, 7, 9, ve 11 donma çözülme çevrimlerinden sonra yapılan deneyler ise referans deneyler ile karşılaştırılmıştır. Serbest basınç deneylerinde katkı oranı olarak seçilen %12'nin donma çözülme çevrimlerindeki başarısızlığının belirlenmesi neticesinde, tek boyutlu ödometre deneylerinde bu oran için herhangi bir deney yapılmamıştır. ASTM D2435 yönetmeliğine göre yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinde uygulanan yükleme ve yük boşaltma adımları Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Tek boyutlu ödometre deneylerinde yükleme ve yük boşaltma adımları

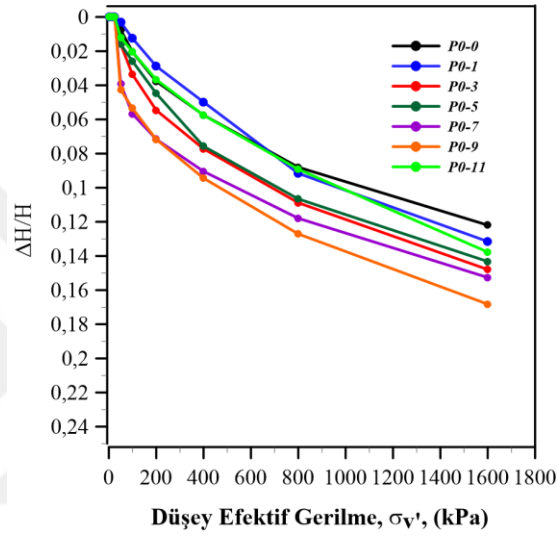
Yükleme ve Yük Boşaltma Adımları	1	2	3	4	5	6	7	8
Yükleme	50♠	100	200	400	800	1600		
Boşaltma							400	100*

♠ : Yük kademesinin 1. dakikasında su ilavesi
* : Son boşaltma adımı

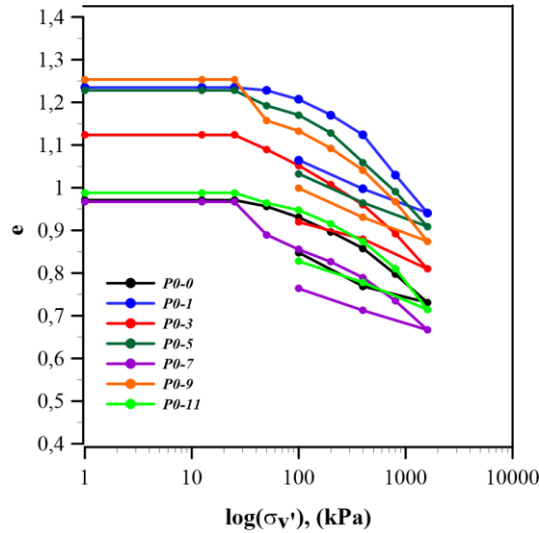
Tek boyutlu ödometre deneylerine tabi tutulan katkılı ve katkısız deney numunelerine önce 1600 kPa gerilme adımına kadar adım adım yükleme yapılmış, daha sonra 100 kPa değerine kadar iki kademe halinde yük boşaltılmıştır. Deneylerde her bir yük adımında 24 saat beklenerek, diğer yük adımına geçilmiştir. Yük boşaltılması sırasında da 24 saat sonundaki değer okunarak deneye devam edilmiştir. 100 kPa yük boşaltma adımında deney sonlandırılmıştır. Böylece,

donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkılı ve katkısız zeminin yük altındaki oturma davranışı belirlenmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkısız (%0 mFDM) ve katkılı (%5, %8, %10 ve %12 mFDM) zemin üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden elde edilen $\Delta H/H$ -düşey efektif gerilme (σ_v') ile boşluk oranı (e) - $\log(\sigma_v')$ ilişkileri, P0 için Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da, P5 için Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, P8 için Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, P10 için Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulmuştur.

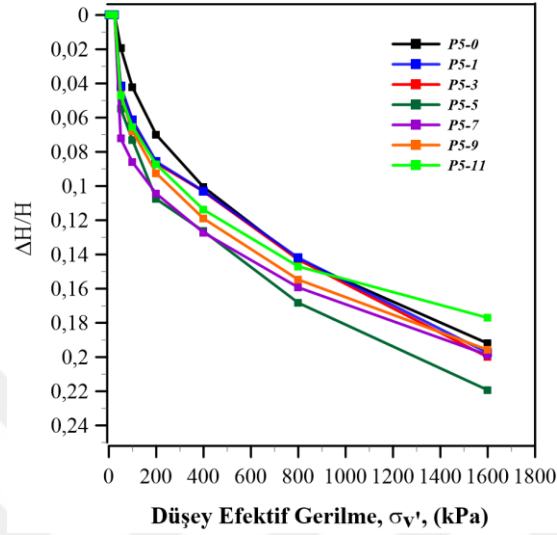


Şekil 4.5 P0 için $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi

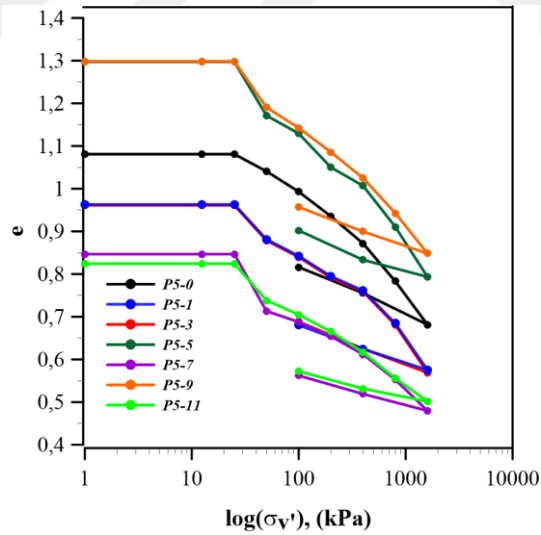


Şekil 4.6 P0 için e - $\log(\sigma_v')$ ilişkisi

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulan katkısız (P0) zeminin tek boyutlu ödometre deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin oturma miktarında artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen $\Delta H/H$ değerleri minimum 0,1219 (0 çevrim) ile maksimum 0,1682 (9. çevrim)’dir.

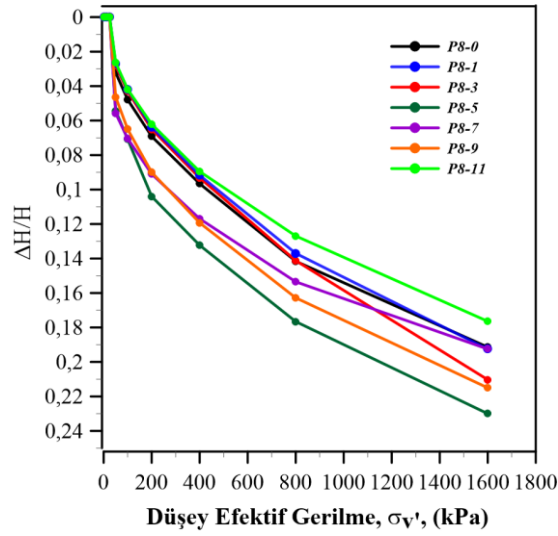


Şekil 4.7 P5 için $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi

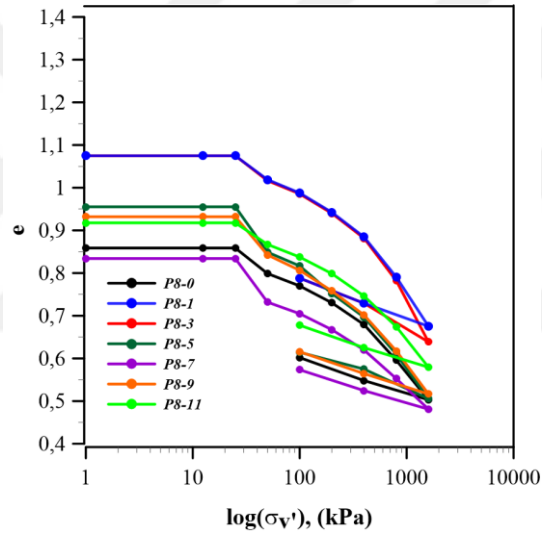


Şekil 4.8 P5 için e - $\log (\sigma_v')$ ilişkisi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sunulan %5 mFDM katkılı (P5) zeminin tek boyutlu ödometre deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin oturma miktarını dar bir aralıkta değiştirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen $\Delta H/H$ değerleri minimum 0,1770 (11. çevrim) ile maksimum 0,2193 (5. çevrim)’dir.

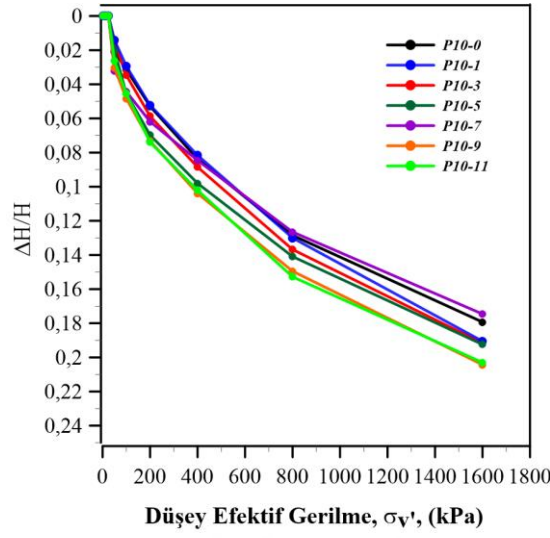


Şekil 4.9 P8 için $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi

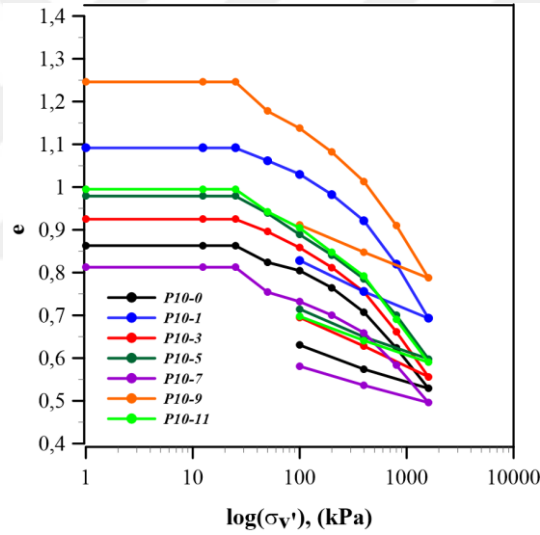


Şekil 4.10 P8 için e - $\log(\sigma_v')$ ilişkisi

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulan %8 mFDM katkılı (P8) zeminin tek boyutlu ödometre deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin oturma miktarını dar bir aralıkta değiştirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen $\Delta H/H$ değerleri minimum 0,1914 (0 çevrim) ile maksimum 0,2300 (5. çevrim)’dir.



Şekil 4.11 P10 için $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi



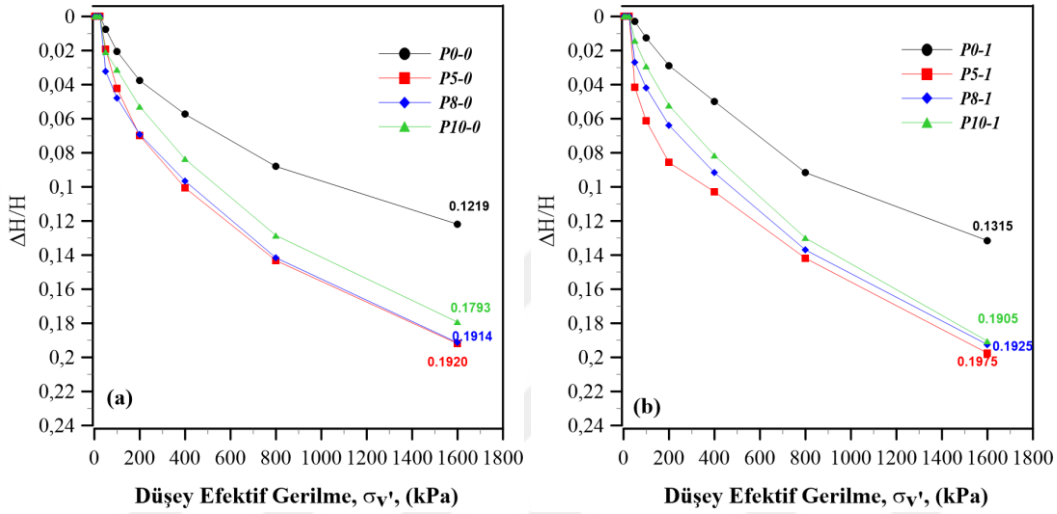
Şekil 4.12 P10 için e - $\log(\sigma_v')$ ilişkisi

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulan %10 mFDM katkılı (P10) zeminin tek boyutlu ödometre deney sonuçlarına göre, artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin oturma miktarını dar bir aralıkta değiştirdiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimleri boyunca zeminde elde edilen $\Delta H/H$ değerleri minimum 0,1793 (0 çevrim) ile maksimum 0,2043 (9. çevrim)'dir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zemin üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden elde

edilen $\Delta H/H$ - düşey efektif gerilme (σ_v') ile e - düşey efektif gerilme (σ_v') ilişkileri, her bir katkı oranı için Şekil 4.5 - Şekil 4.12'de ayrı ayrı sunulmuştur.

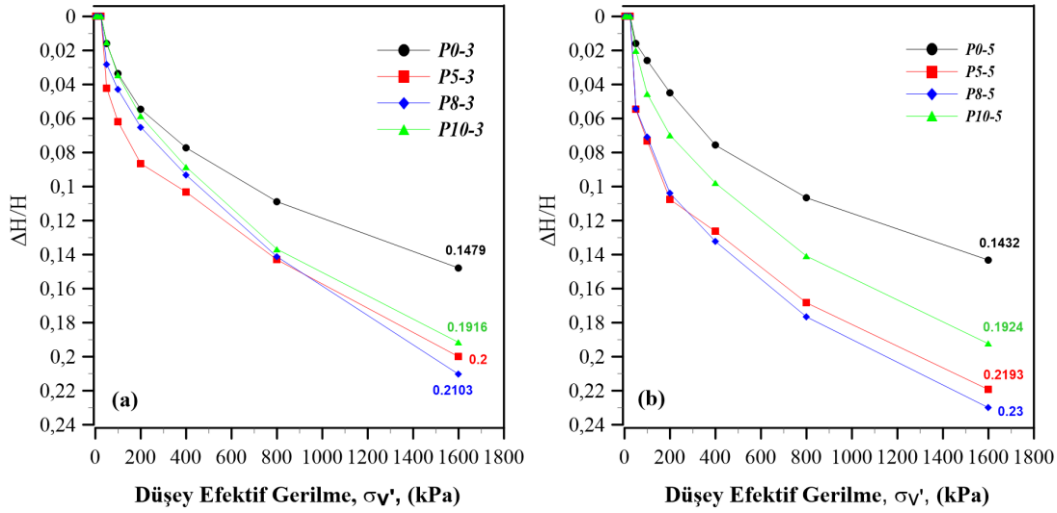
Bunun yanı sıra, değişen donma çözülme çevrim sayısının katkılı ve katkısız zemin üzerindeki etkisi, her bir çevrim için ayrı ayrı incelenmiş ve $\Delta H/H$ - düşey efektif gerilme (σ_v') davranışı çevrimsiz ve 1. çevrim için Şekil 4.13a ve Şekil 4.13b'de, 3. ve 5. çevrim için Şekil 4.14a ve Şekil 4.14b'de, 7. ve 9. çevrim için Şekil 4.15a ve Şekil 4.15b'de, 11. çevrim için Şekil 4.16'da sunulmuştur.



Şekil 4.13 $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi (Çevrimsiz ve 1 çevrim)

Şekil 4.13a'da donma çözülme çevrimine maruz bırakılmamış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.13a'daki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1219-0,1920 aralığında meydana gelmiştir. P5 ve P8 zeminlerinin oturma davranışı birbirinin aynısıdır. P5 ve P8 zeminlerinde $\Delta H/H$ değeri artarken, P10 zemininde $\Delta H/H$ değeri azalma eğilimine geçmiştir.

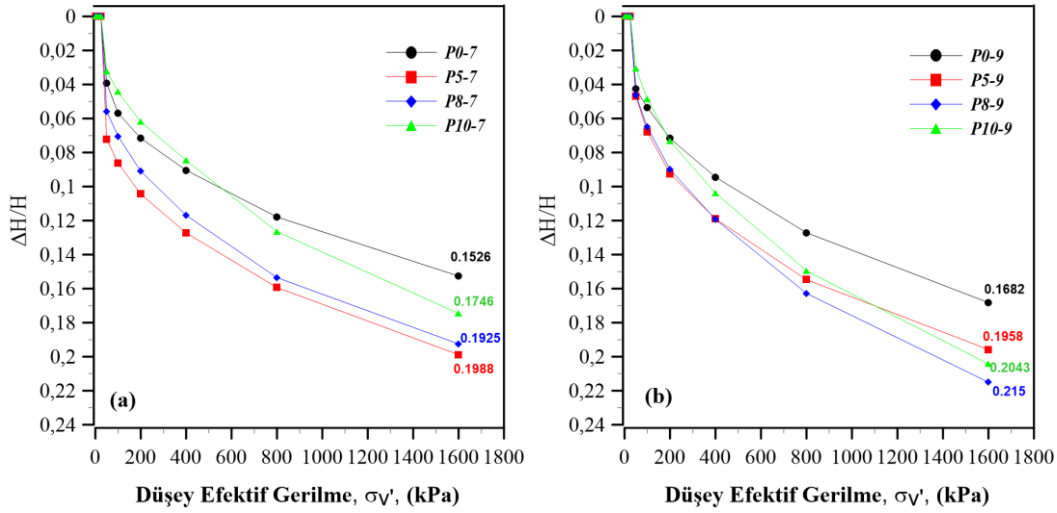
Şekil 4.13b'de 1 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.13b'deki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1315-0,1975 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 1 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1219'dan 0,1315'e artış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin oturma davranışları birbirinin aynısı olup, $\Delta H/H$ değerleri 1 DÇ çevrimi sonunda değişmezken, P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri 0,1793'ten 0,1905'e artış göstermiştir.



Şekil 4.14 $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi (3 çevrim ve 5 çevrim)

Şekil 4.14a'da 3 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.14a'daki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1479-0,2103 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 3 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1315'ten 0,1479'a artış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin oturma davranışları ise bu çevrimde farklı eğilim göstermiştir. Artan DÇ çevrim sayısı ile 0,1975 ve 0,1925 olan P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ değerleri 0,2000 ve 0,2103 olmuştur. P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri ise 0,1905'ten 0,1916'ya değişim göstermiştir. Bu çevrimde P10 zemin için artan DÇ çevrim sayısının oturmayı arttırdığı söylenemez.

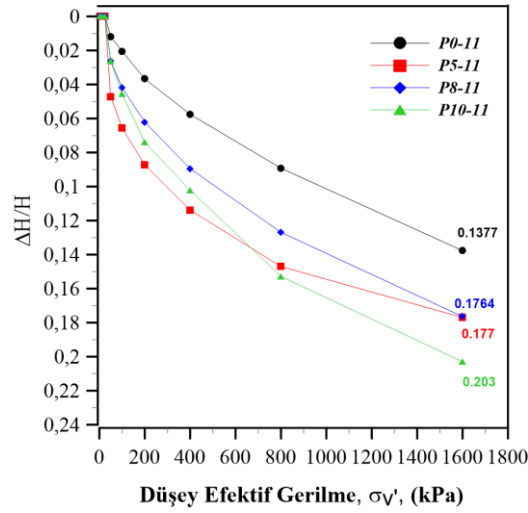
Şekil 4.14b'de 5 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.14b'deki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1432-0,2300 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 5 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1479'dan 0,1432'ye değişim göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ - σ_v' eğrilerinin eğimi birbirine çok benzerdir. Artan DÇ çevrim sayısı ile 0,2000 ve 0,2103 olan P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ değerleri 0,2193 ve 0,2300 olmuştur. P5 ve P8 zeminlerinin oturma değerleri sınırlı bir aralıkta değişim göstererek artış eğilimine geçmiştir. P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri ise 0,1916'dan 0,1924'e değişim göstermiştir. Bu çevrimde P10 zemin için artan DÇ çevrim sayısının oturmayı arttırdığı söylenemez.



Şekil 4.15 $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi (7 çevrim ve 9 çevrim)

Şekil 4.15a'da 7 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.15a'daki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1526-0,1988 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 7 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1432'den 0,1526'ya artış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ - σ_v' eğrilerinin eğimi bir önceki çevrimde olduğu gibi birbirine çok benzerdir. Artan DÇ çevrim sayısı ile 0,2193 ve 0,2300 olan $\Delta H/H$ değerleri 0,1988 ve 0,1925'e azalış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin oturma değerleri sınırlı bir aralıkta değişim göstererek azalma eğilimine geçmiştir. P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri ise 0,1924'ten 0,1746'ya azalış göstermiştir.

Şekil 4.15b'de 9 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.15b'deki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1682-0,2150 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 9 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1526'dan 0,1682'ye artış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ - σ_v' eğrilerinin eğimi birbirinden farklılaşmıştır. 0,1988 ve 0,1925 olan $\Delta H/H$ değerleri 0,1958 ve 0,2150'ye değişim göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin oturma değerleri sınırlı bir aralıkta değişim göstermiştir. P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri ise 0,1746'dan 0,2043'e artış göstermiştir.



Şekil 4.16 $\Delta H/H$ - (σ_v') ilişkisi (11 çevrim)

Şekil 4.16'da 11 DÇ çevrimine maruz kalmış katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) zeminlerin tek boyutlu sıkışma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.16'daki eğrilerde nihai gerilme adımı olan 1600 kPa'daki $\Delta H/H$ değerleri 0,1377-0,2030 aralığında meydana gelmiştir. P0 zeminin 11 çevrim sonundaki $\Delta H/H$ değeri 0,1682'den 0,1377'ye azalış göstermiştir. P5 ve P8 zeminlerinin $\Delta H/H$ - σ_v' eğrilerinin eğimi birbirinden farklılaşmıştır. 0,1958 ve 0,2150 olan $\Delta H/H$ değerleri 0,1770 ve 0,1764'e azalış göstermiştir. P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri ise 0,2043'ten 0,2030'e değişim göstermiştir.

Ayrıca, katkılı ve katkısız zemin üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinde uygulanan nihai gerilme değeri (1600 kPa) için elde edilen $\Delta H/H$ değerleri her bir deney numunesi için numunenin temsil ettiği tabaka bilgisi ile birlikte Tablo 4.2'de sunulmuştur.

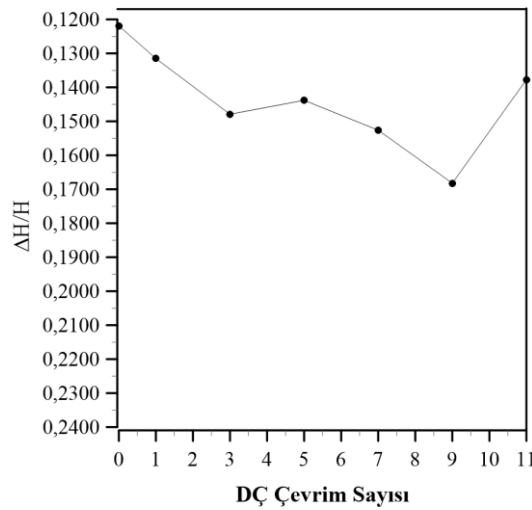
Tablo 4.2 P0, P5, P8, P10 için tabaka bilgisi ve $\Delta H/H$ değerleri

<i>ID</i>	<i>$\Delta H/H$</i>	<i>Tabaka</i>	<i>ID</i>	<i>$\Delta H/H$</i>	<i>Tabaka</i>
<i>P0-0</i>	0,1219	Orta	<i>P5-0</i>	Orta	0,1920
<i>P0-1</i>	0,1315	Alt	<i>P5-1</i>	Alt	0,1975
<i>P0-3</i>	0,1479	Orta	<i>P5-3</i>	Orta	0,2000
<i>P0-5</i>	0,1438	Orta	<i>P5-5</i>	Orta	0,2193
<i>P0-7</i>	0,1526	Orta	<i>P5-7</i>	Alt	0,1988
<i>P0-9</i>	0,1682	Üst	<i>P5-9</i>	Üst	0,1958
<i>P0-11</i>	0,1377	Üst	<i>P5-11</i>	Üst	0,1770
<i>ID</i>	<i>Tabaka</i>	<i>$\Delta H/H$</i>	<i>ID</i>	<i>Tabaka</i>	<i>$\Delta H/H$</i>
<i>P8-0</i>	Orta	0,1914	<i>P10-0</i>	Orta	0,1793
<i>P8-1</i>	Alt	0,1925	<i>P10-1</i>	Alt	0,1905
<i>P8-3</i>	Orta	0,2103	<i>P10-3</i>	Orta	0,1916
<i>P8-5</i>	Orta	0,2300	<i>P10-5</i>	Orta	0,1924
<i>P8-7</i>	Alt	0,1925	<i>P10-7</i>	Alt	0,1746
<i>P8-9</i>	Üst	0,2150	<i>P10-9</i>	Üst	0,2043
<i>P8-11</i>	Üst	0,1764	<i>P10-11</i>	Üst	0,2030

Şekil 4.13-4.16’da gösterilen mFDM katkılı ve katkısız zemin numunelerinin düşey efektif gerilme-sıkışma davranışlarının oldukça benzer olduğu görülmektedir. Deneyde uygulanan ilk gerilmede sıkışma başlangıçta hızlıdır. Zaman geçtikçe sıkışmanın hızı yavaşlamıştır. Belirli bir süre sonunda o yük altındaki oturma ihmal edilebilecek kadar yavaşlamış ve sona ermiştir. Bir yükleme adımındaki oturma tamamlandığında, gerilme seviyesi arttırılmıştır. Böylece her bir yükleme adımında bu davranış kendini tekrar etmiştir.

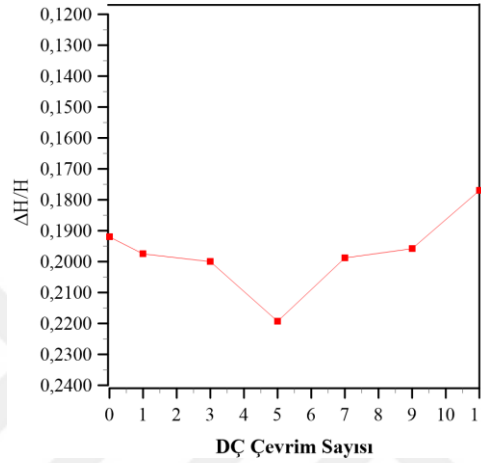
Şekil 4.13b – 4.16’da farklı donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkılı ve katkısız numunelerin $\Delta H/H$ değerindeki değişimler gösterilmiştir. Artan donma çözülme çevrimlerinin özellikle katkısız (P0) zeminin oturma miktarını önemli miktarda arttırdığı görülmektedir. P5, P8, P10 zeminlerin oturmaları her bir çevrimde P0 zeminin oturmasından daha fazladır. Ancak, P0 zeminde artan donma çözülme çevrimlerinde oturmanın arttığı (0,1219-0,1682) ve mFDM katkısının artan donma çözülme çevrimlerinde zeminin oturmasını stabil tuttuğu belirlenmiştir. P10 zeminde oturmaların, P5 ve P8 zemine göre daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.13(a)-4.16’dan, mFDM ilave edilmiş zeminin $\Delta H/H$ – düşey efektif gerilme eğrisinin eğiliminin, farklı mFDM içerikleri altında birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2’de sunulan $\Delta H/H$ değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki, P0 için Şekil 4.17’de, P5 için Şekil 4.18’de, P8 için Şekil 4.19’da, P10 için Şekil 4.20’de ayrı ayrı olacak şekilde sunulmuştur.



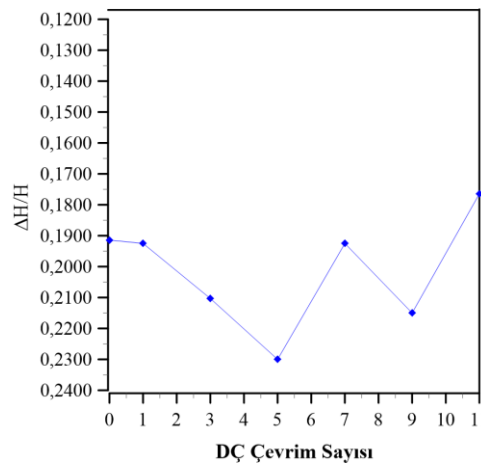
Şekil 4.17 P0 için $\Delta H/H$ – DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 4.17 ve Tablo 4.2’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) P0 zeminin $\Delta H/H$ değeri 0,1219 iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 0,1315, 0,1479, 0,1438, 0,1526, 0,1682 ve 0,1377 değerlerini almıştır. $\Delta H/H$ değerleri 3. çevrime kadar azalmış, 5. çevrimde küçük bir artış göstermiş, 5. çevrimden 9. çevrime kadar yine azalma eğilimine geçmiştir. Son çevrimde ise numunenin $\Delta H/H$ değerinde artış gözlemlenmiştir.



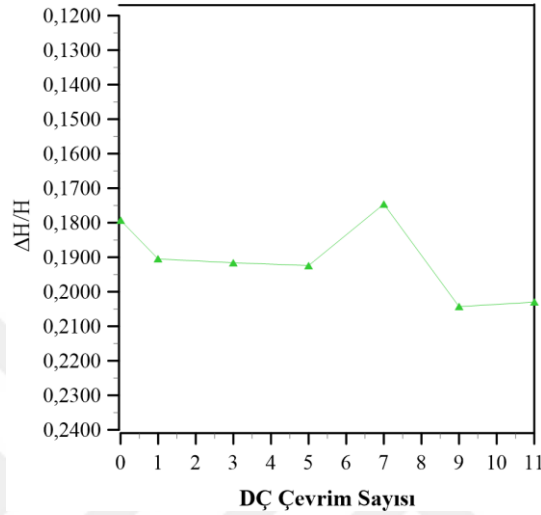
Şekil 4.18 P5 için $\Delta H/H$ – DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 4.18 ve Tablo 4.2’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) P5 zeminin $\Delta H/H$ değeri 0,1920 iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 0,1975, 0,2000, 0,2193, 0,1988, 0,1958 ve 0,1770 değerlerini almıştır. $\Delta H/H$ değerleri 5. çevrime kadar azalmış, 5. çevrimden itibaren artış göstermiştir.



Şekil 4.19 P8 için $\Delta H/H$ - DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 4.19 ve Tablo 4.2’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) P8 zeminin $\Delta H/H$ değeri 0,1914 iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 0,1925, 0,2103, 0,2300, 0,1925, 0,2150 ve 0,1764 olarak değerlerini almıştır. $\Delta H/H$ değerleri 5. çevrime kadar azalmış, 7. çevrimde artmış, 9. çevrimde azalmış ve 11. çevrimde tekrar artış göstererek farklı bir eğilim göstermiştir.



Şekil 4.20 P10 için $\Delta H/H$ – DÇ çevrim ilişkisi

Şekil 4.20 ve Tablo 4.2’de sunulan deney sonuçları değerlendirildiğinde, donma çözülme çevrimine maruz kalmayan (0 çevrim) P10 zeminin $\Delta H/H$ değeri 0,1793 iken, her bir çevrimde (1, 3, 5, 7, 9, 11) sırasıyla 0,1905, 0,1916, 0,1924, 0,1746, 0,2043 ve 0,2030 olarak değerlerini almıştır. $\Delta H/H$ değerleri 7. çevrime kadar değişmemiş, 7. çevrimde azalmış, ardından 9. ve 11. çevrimlerde yine aynı değerleri almıştır.

Şekil 4.17-Şekil 4.20’de sunulduğu üzere, %10 mFDM katkı oranının zeminin $\Delta H/H$ değerlerini P5 ve P8 zemine göre çok daha küçük bir aralıkta değiştirdiği görülmektedir.

3. bölümde “2.1.1. Numune Hazırlama Metodu” başlığında da detaylı bir biçimde de açıklandığı üzere; tek boyutlu ödometre deneyleri için hazırlanan deney numunelerinin donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmadığı (P0-0, P5-0, P8-0, P10-0) durumlarda, deney numuneleri deney başlangıcına kadar desikatörde bekletilmiş, bu sürenin 2 günden fazla olmamasına özen gösterilmiştir (Şekil 4.21). Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numuneleri ise hazırlandığı

andan itibaren herhangi bir ortamda/desikatörde bekletilmeden Şekil 2.12'deki donma çözülme kabinine yerleştirilmiştir.



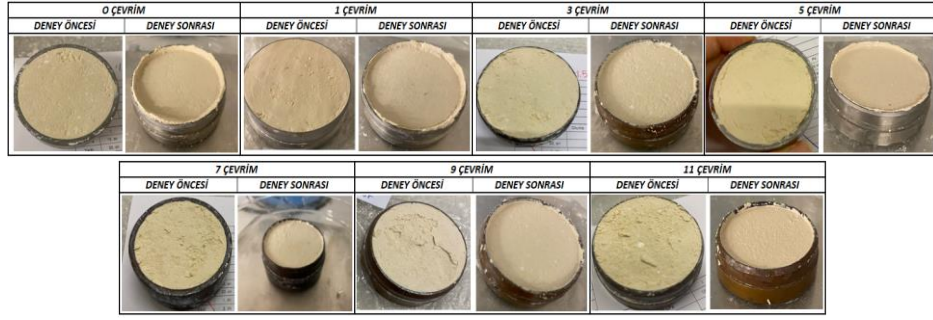
Şekil 4.21 Deney numunelerinin desikatörde bekletilmesi

Tüm deney numunelerinin kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra, tek boyutlu ödometre deneyleri öncesi ve deney sonrası görüntüleri çekilmiştir. Böylece, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numunelerinin kabinden önceki ve sonraki durumları gözlemlenerek, donma çözülme çevrimlerinin numunenin yüzeyinde yarattığı hasar da incelenmiştir. Donma çözülme çevrimlerinin numunenin iç yapısında meydana getirdiği hasar durumu ise Bölüm 6'da detaylı bir biçimde sunulmuştur. Ayrıca, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılıp bırakılmadığı fark etmeksizin deney numunelerinin yük altındaki oturma miktarları gözlemlenmiştir.

Katkılı (P5, P8, P10, P12) ve katkısız (P0) zeminin tek boyutlu ödometre deney öncesi (donma çözülme kabinine yerleştirilip ilgili çevrim sonunda kabinden alındıktan sonraki) ve tek boyutlu ödometre deney sonrası görüntüleri her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 4.22 – Şekil 4.25'te ayrı ayrı sunulmuştur.



Şekil 4.22 P0 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 4.23 P5 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 4.24 P8 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 4.25 P10 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler

Şekil 4.22– Şekil 4.25’te verilen görüntülerde mFDM katkılı zeminin deney öncesi (donma çözülme çevrimlerinden sonra kabinden alınmasının akabinde) görüntülerinde, donma çözülme çevrimlerinin zemin yüzeyinde gözle görülebilir bir hasar bıraktığı, deney sonrası görüntüler de ise bu hasara bağlı olarak zeminin oturma miktarlarının değiştiği belirlenmiştir.

Tek boyutlu ödometre deneyleri için kompaksiyon kalıbından numune alımı sırasında, %5, %8, %10 oranlarında zemine ilave edilen mFDM’nin zeminle homojen bir karışım oluşturduğu Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 mFDM-zemin homojen karışım görüntüleri

Şekil 4.22 – Şekil 4.25’te sunulan deney öncesi ve deney sonrası çekilen fotoğrafların yanı sıra, tüm deney numunelerinin kabine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra (tek boyutlu ödometre deneyi öncesi) ve deney sonrası ağırlıkları tartılarak, donma çözülme çevrimlerinin zeminde dane kaybına sebep olup olmadığı incelenmiştir. Buna ilave olarak, ölçülen ağırlıklar ile su muhtevaları da kontrol edilmiş olup, hem hedeflenen su muhtevası değerine ulaşıp ulaşılmadığı hem de Şekil 2.9’daki gibi hazırlanan deney numunelerinin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevasını kaybedip kaybetmediği belirlenmiştir. Tablo 2.14’te yer alan su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin su muhtevası değerleri ve dane kaybı miktarları Tablo 4.3’te sunulmuştur.

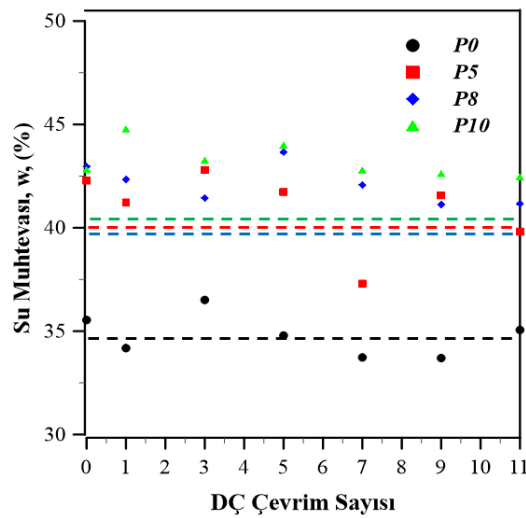
Tablo 4.3 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri

<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>	<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>
<i>P0-0</i>	35,54	0,00	<i>P5-0</i>	42,28	0,00
<i>P0-1</i>	34,18	0,20	<i>P5-1</i>	41,22	0,30
<i>P0-3</i>	36,51	0,40	<i>P5-3</i>	42,80	0,25
<i>P0-5</i>	34,79	0,20	<i>P5-5</i>	41,73	0,80
<i>P0-7</i>	33,73	0,00	<i>P5-7</i>	37,30	0,80
<i>P0-9</i>	33,70	0,40	<i>P5-9</i>	41,57	1,60
<i>P0-11</i>	35,06	0,40	<i>P5-11</i>	39,81	1,70

Tablo 4.3 P0, P5, P8, P10 için su muhtevası ve dane kaybı değerleri (devamı)

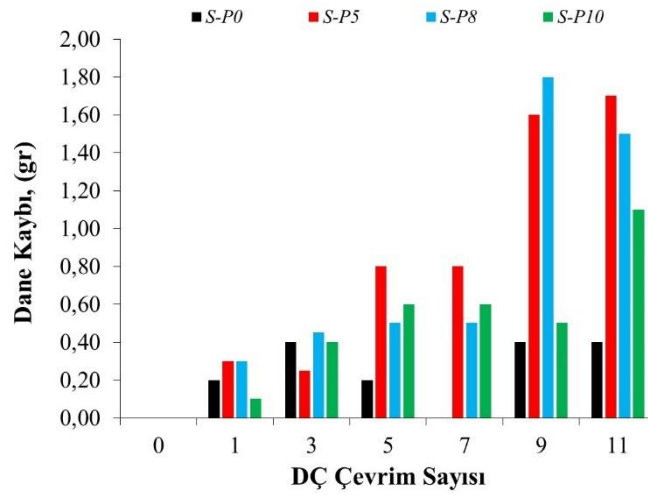
<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>	<i>ID</i>	<i>w, (%)</i>	<i>gr</i>
P8-0	42,96	0,00	P10-0	42,82	0,00
P8-1	42,33	0,30	P10-1	44,77	0,10
P8-3	41,44	0,45	P10-3	43,26	0,40
P8-5	43,66	0,50	P10-5	43,99	0,60
P8-7	42,07	0,50	P10-7	42,78	0,60
P8-9	41,12	1,80	P10-9	42,62	0,50
P8-11	41,16	1,50	P10-11	42,46	1,10

Tablo 2.14’te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, deney başındaki (ilgili çevrimlerin ardından kabinden çıkarıldıktan sonraki) su muhtevası değerleri Tablo 4.3’te her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 4.27’de ise hedeflenen su muhtevası değeri ile ölçülen su muhtevası değerleri arasındaki fark sunulmuştur. Şekil 4.27’deki kesikli çizgiler numunelerin hazırlandığı su muhtevası değerlerini, semboller ise deney başı su muhtevası değerlerini temsil etmektedir.

**Şekil 4.27** Hedeflenen ve ölçülen su muhtevası değerleri

Tablo 4.3 ve Şekil 4.27’de sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevası $\pm 1,50$ mertebesinde değişmiştir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminin donma çözülme çevrimleri sonunda su muhtevalarında sırasıyla $+3,80$ $+3,60$ $\%4,77$ mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

Tablo 2.14’te verilen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan deney numunelerinin, donma çözülme kabine konulmadan önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülmüş, donma çözülme çevrimleri boyunca ağırlıklarında meydana gelen değişimler Tablo 4.3’te her bir çevrim ve katkı oranı için sunulmuştur. Şekil 4.28’de, meydana gelen numune kayıplarının donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak değişimi, katkı oranı da dikkate alınarak sunulmuştur.

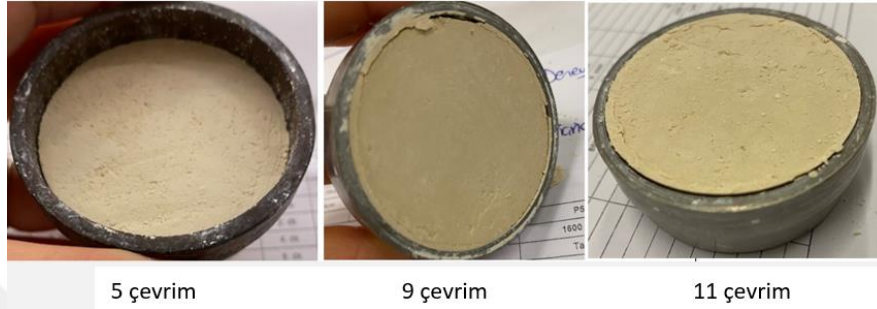


Şekil 4.28 Dane kaybı miktarı-DÇ çevrim ilişkisi

Tablo 4.3 ve Şekil 4.28’de sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminde, donma çözülme çevrimleri sonunda meydana gelen dane kaybı miktarı $0,40$ gr mertebesinde dir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerlerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminde ise donma çözülme çevrimleri sonunda dane miktarlarında sırasıyla $1,70$ gr, $+1,80$ gr, $+1,10$ gr değişim meydana gelmiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan deney numuneleri kabinden alındıktan sonra dikkatli bir şekilde strech filminden ayrılmaktadır. Şekil 4.22-Şekil 4.25’te deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri verilen donma çözülme çevrimlerine

maruz bırakılan ödometre deney numuneleri, biten çevrimlerinin ardından kabinden alınmış, kabinden alınan numunelerin üzerindeki streç film dikkatli ve hassas bir biçimde açılmıştır. Ancak, uzun çevrimler sonunda numunelerin bir kısmı Şekil 4.29’da olduğu problem teşkil edecek kadar hasar görmüştür. Bu numuneler üzerinde deney yapılmamış, ilgili çevrim için yeni bir numune alınmıştır.



Şekil 4.29 Çevrimler sonunda hasar gören numuneler

4.2 Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyleri

Donma çözülme çevrimlerine “maruz kalmayan” mFDM’li zemin karışımlarının hidrolik iletkenlik davranışı laboratuvarında yapılan düşen seviyeli permabilite deneyleri ile incelenmiştir. Yapılan düşen seviyeli permeabilite deneylerinde donma çözülme çevrimleri uygulanmamış, yalnızca mFDM’nin zeminin hidrolik iletkenliğine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, Tablo 2.3’te belirtilen 2. prosedür baz alınmış, her bir karışım Şekil 2.32 ve Tablo 2.14’te belirlenen optimum su muhtevası değerinde ve standart kompaksiyon enerjisinde Şekil 2.9’daki gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, Şekil 4.30’da sunulan 10 cm çapında ve 11 cm yüksekliğindeki altı delik permeabilite kalıplarında sıkıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.30 Permeabilite deney hücreleri

Belirtilen prosedürlere uygun olarak hazırlanan katkısız zemin (P0-0) üzerinde yapılan deney sonucu referans deney olarak kabul edilmiş, mFDM katkılı (P5, P8, P10) zeminde yapılan deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle, katkı malzemesinin, herhangi bir donma çözülme çevrimine maruz kalmayan zeminin hidrolik iletkenliğine etkisi belirlenmiştir. ASTM D5084 yönetmeliği baz alınarak yapılan düşen seviyeli permeabilite deneylerinde, Şekil 4.30'da hücrelerde hazırlanan numuneler doygunluğa ulaşana kadar, Şekil 4.31'de gösterildiği gibi 7 kPa-35 kPa arasında bir hava ile vakum uygulanarak desikatörde bekletilmiştir.



Şekil 4.31 Permeabilite deneylerinde vakum uygulanması-doyurma aşaması

Şekil 4.31'deki gibi doygunluk aşamasında yaklaşık 2 ay bekletilen deney numuneleri, doygunluk sürecinin sonunda Şekil 4.32'deki düşen seviyeli permeabilite deney sistemine bağlanmıştır.



Şekil 4.32 Düşen seviyeli permeabilite düzeneği

Şekil 4.32'deki düşen seviyeli permeabilite sistemine bağlanan deney numunelerinin her gün düzenli olarak okuması alınmıştır. Alınan okuma değerleri yardımıyla, permeabilite katsayısı (k), (4.1) eşitliğine göre hesap edilmiştir.

$$k = \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4.1)$$

Formülde yer alan;

a: Şekil 4.32'de yer alan düşey borunun enkesit alanı

L: Şekil 4.30'daki hücrelerde kompakte edilen zemin numunesinin yüksekliği

A: Şekil 4.30'daki hücrelerde kompakte edilen zemin numunesinin alanı

h₁: t₁ zamanında okuması yapılan su yüksekliği

h₂: t₂ zamanında okuması yapılan su yüksekliği

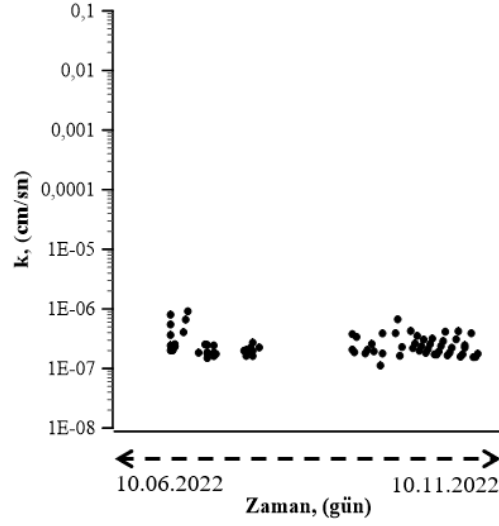
Δt: t₂-t₁: okuma yapılan zaman farkı'nı temsil etmektedir.

Hesap edilen permeabilite katsayısı (k)'nın sabitlenmesi ile deneyler sonlandırılmıştır.

Katkılı ve katkısız zemin üzerinde yapılan permeabilite deneylerinde elde edilen k (cm/s) değerleri Tablo 4.4'te sunulmuştur. Ayrıca, k değerlerinin zamana bağlı değişimi P0 için Şekil 4.33'te, P5 için Şekil 4.34'te, P8 için Şekil 4.35'te, P10 için Şekil 4.36'da ayrı ayrı olacak şekilde verilmiştir. Katkılı ve katkısız tüm deney numunelerinin k (cm/s) değerleri ise Şekil 4.37'de bir arada verilmiştir.

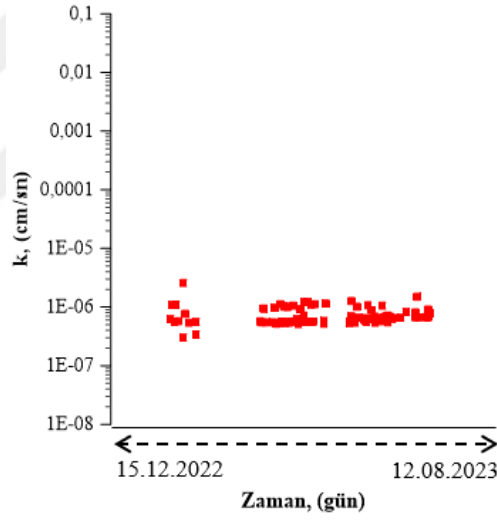
Tablo 4.4 P0, P5, P8, P10 için k değerleri

<i>Mix ID</i>	<i>k (cm/sn)</i>
P0	2,66 x 10 ⁻⁷
P5	7,67 x 10 ⁻⁷
P8	1,22 x 10 ⁻⁶
P10	6,21 x 10 ⁻⁷



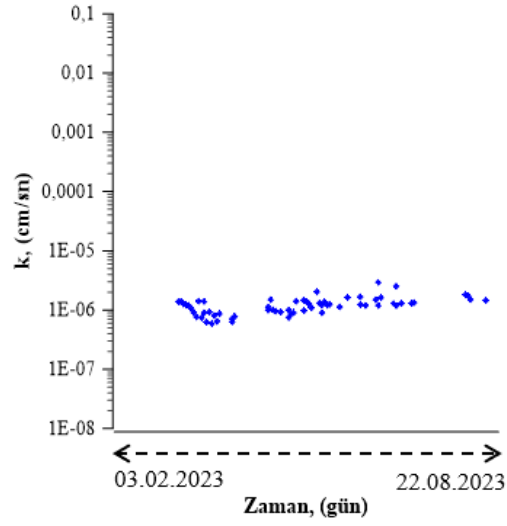
Şekil 4.33 P0 için k-zaman ilişkisi

P0 zemin üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyi ile hesap edilen permeabilite katsayısı (k) $2,66 \times 10^{-7}$ 'dir.



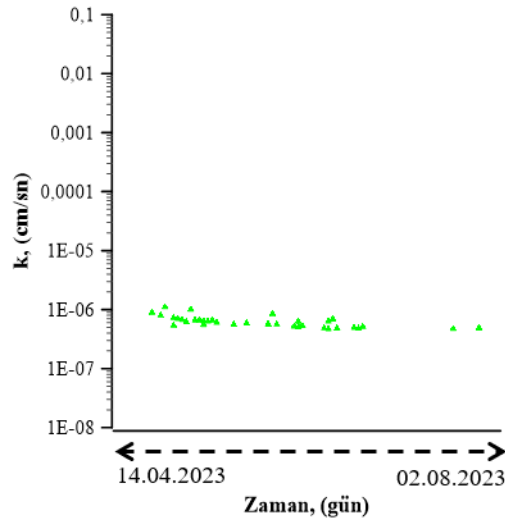
Şekil 4.34 P5 için k-zaman ilişkisi

P5 zemin üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyi ile hesap edilen permeabilite katsayısı (k) $7,67 \times 10^{-7}$ 'dir.



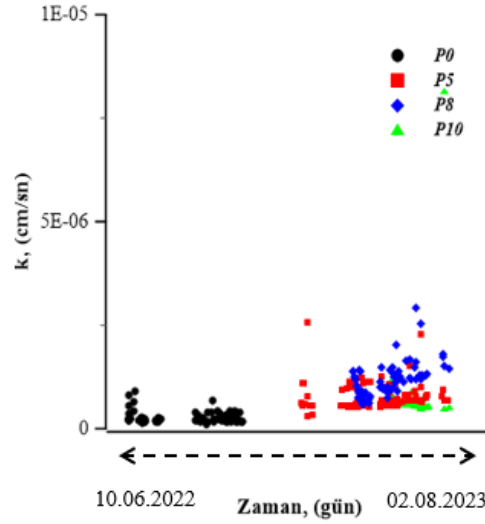
Şekil 4.35 P8 için k-zaman ilişkisi

P8 zemin üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite ile elde edilen permeabilite katsayısı (k) $1,22 \times 10^{-6}$ 'dır.



Şekil 4.36 P10 için k-zaman ilişkisi

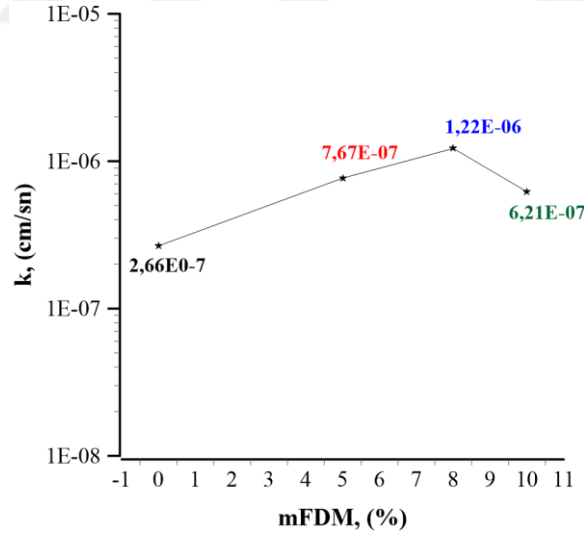
P10 zemin üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyi ile elde edilen permeabilite katsayısı (k) $6,21 \times 10^{-7}$ 'dir.



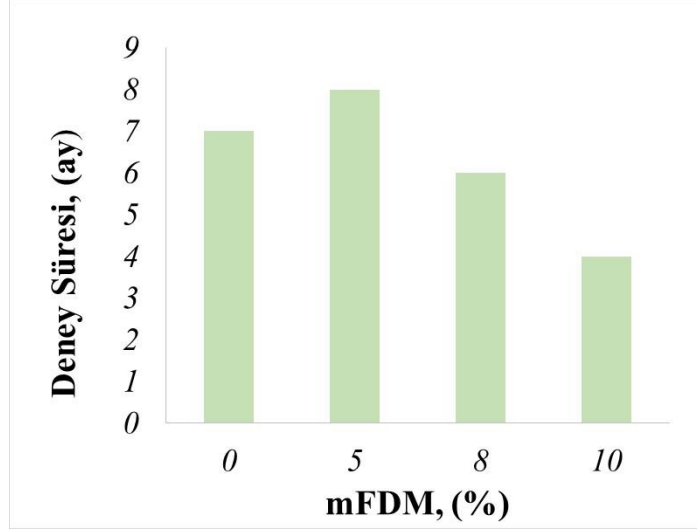
Şekil 4.37 P0, P5, P8 ve P10 için k-zaman ilişkisi

P0, P5, P8 ve P10 zemin üzerinde yapılan permeabilite deneylerinden elde edilen permeabilite katsayısı değerleri birbirine oldukça yakındır.

Düşen seviyeli permeabilite deneylerden hesap edilen permeabilite katsayısının mFDM oranına göre değişimi Şekil 4.38’de, deney sürelerinin mFDM oranına göre değişimi ise Şekil 4.39’da sunulmuştur.



Şekil 4.38 mFDM-k ilişkisi



Şekil 4.39 mFDM-deney süresi ilişkisi

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da sunulan veriler doğrultusunda mFDM oranındaki artış, zeminin hidrolik iletkenlik davranışında herhangi bir değişikliğe sebep olmamıştır.

Şekil 4.39’da da görüldüğü üzere düşen seviyeli permeabilite deneyleri P0 zemin için 7 ay, P5 zemin için 8 ay, P8 zemin için 6 ay, P10 zemin için 4 ay sürmüştür. mFDM oranının artması ile permeabilite deneylerinin süresinde azalma meydana gelmiştir.

Tablo 2.14’te sunulan optimum su muhtevası değerlerinde sıkıştırılarak hazırlanmış P0, P5, P8 ve P10 zeminlerinin permeabilite deneyi öncesi ve permeabilite deney sonrası su muhtevaları ölçülmüş ve hedeflenen su muhtevası değerlerine ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmiştir (Tablo 4.5). Deney öncesi su muhtevası değerleri, deney için hazırlanan mFDM’li zemin karışımlarının hazırlandığı tepsi içerisinden alınan örneklerle belirlenmiştir. Deney sonrası su muhtevası değerleri ise, deney sonunda mFDM’li zemin karışımlarının permeabilite kalıbından boşaltılması sırasında tabakalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

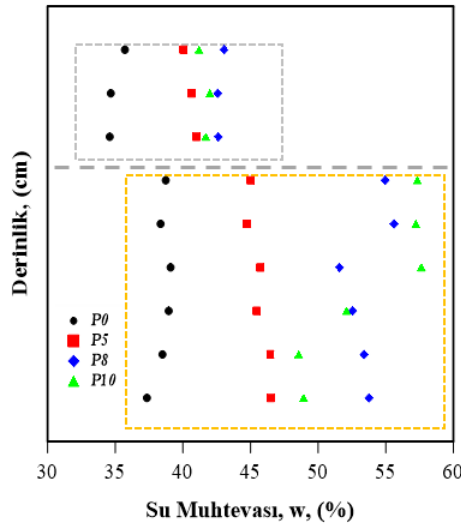
Tablo 4.5 P0, P5, P8, P10 için deney öncesi ve deney sonrası su muhtevası değerleri

	<i>P0</i>	<i>P5</i>	<i>P8</i>	<i>P10</i>
	35,71	40,05	43,04	41,2
<i>wilk_s</i> (%)	34,67	40,65	42,58	42,0
	34,59	41,00	42,62	41,7
	38,73	45,01	54,95	57,32
	38,05	44,75	55,62	57,23
<i>w_{son}</i> (%)	39,09	45,73	51,58	57,64
	38,95	45,45	52,54	52,10
	38,49	46,47	53,40	48,56
	37,34	46,50	53,76	48,93

wilk: Deney Öncesi

w_{son}: Deney Sonrası

Tablo 4.5'te sunulan deney öncesi ve deney sonrası su muhtevası değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4.40'ta sunulmuştur.



Şekil 4.40 Su muhtevası-derinlik ilişkisi

Şekil 4.40'ta gri kesikli çizgiler zemin numunesinin deney öncesi su muhtevası değerlerini temsil etmektedir. Turuncu kesikli çizgiler ise zemin numunesinin deney sonrası su muhtevelarını göstermektedir. Permeabilite deneyleri için hazırlanan deney numunelerinin deney başındaki su muhteveları, permeabilite deneyleri sonunda artış göstermiştir. Tablo 4.5 ve Şekil 4.40'da sunulan veriler doğrultusunda, $w_{opt} = \%34,80$ değerinde hazırlanan katkısız (P0) zeminde, deney sonunda su muhtevası değişimi $+\%4,40$ mertebesindedir. $w_{opt} = \%39,00$ ve $w_{opt} = \%40,0$ değerinde hazırlanan katkılı (P5, P8, P10) zeminde ise su muhtevelarında sırasıyla maks. $+\%6,45$, $+\%11,18$, $+\%16,44$ mertebesinde değişim meydana gelmiştir.

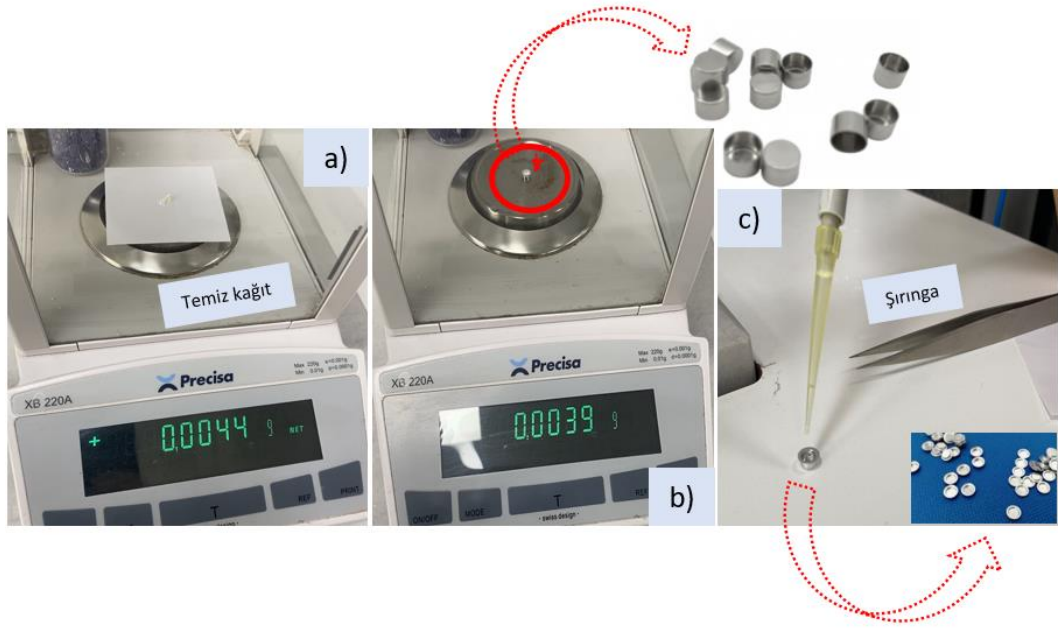
MİKRO-YAPI ANALİZLERİ

Termal özelliği olan ve Şekil 2.13'te sunulan donma çözülme sıcaklık sınır değerleri arasında faz değiştirme özelliği gösteren FDM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin mukavemet, oturma ve hidrolik iletkenlik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiş ve detaylı bir biçimde Bölüm 2, Bölüm 3, ve Bölüm 4'te sunulmuştur.

Gerçekleştirilen tüm deneylerde, deney numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası ağırlık, su muhtevası, dane kaybı, hacim değişimi, çap ve boy, görüntü vb. değişmesi mümkün olan tüm özellikler not edilmiştir. Makro-yapıda meydana gelen değişimlerin mikro-yapıdan kaynaklı olması sebebiyle, deneysel çalışmalarda baz alınan katkı oranları (%0, %5, %8, %10) için termal (DSC), elementel (FT-IR, XRD ve XRF, ICP-MS (Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi), görüntü (SEM, Micro CT) analizleri yaptırılmıştır. Termal, elementel ve görüntü (SEM) analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda, görüntü analizi Micro CT ise Tegnogem Mühendislik Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti'de yaptırılmıştır.

5.1 Termal Analizler

Şekil 2.13'te sunulan donma çözülme çevrim koşullarına uygunluk sağlayacak FDM'nin seçilmesi için yapılan DSC analizi hem likit FDM üzerinde hem de mFDM üzerinde gerçekleştirilmiş, detaylı bir biçimde Şekil 2.26, Şekil 2.27 ve Tablo 2.11'de sunulmuştur. Sadece FDM üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerinin tüm katkı oranları için de yaptırılması planlanmıştır. Ancak, DSC analizlerinin yapılma aşamasında karşılaşılan zorluklar sebebi ile sadece %10 katkı oranı için analizler gerçekleştirilebilmiş, %5 ve %8 katkı oranları için DSC analizleri gerçekleştirilememiştir. Toz halindeki mFDM, likit haldeki FDM ve %10 mFDM katkılı zemin (P10) üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerinde izlenen adımlar Şekil 5.1'de sunulmuştur.



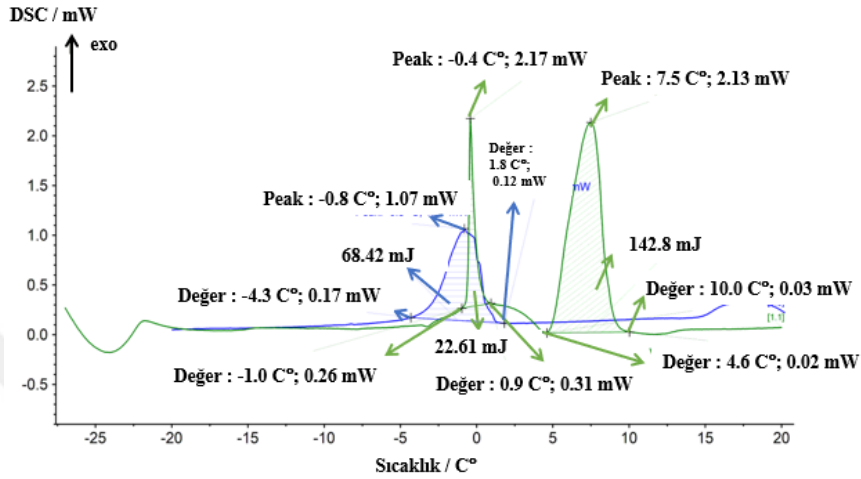
Şekil 5.1 DSC analiz adımları

DSC analizlerinde kullanılan malzeme miktarı 10 ± 2 mg, analizlerde kullanılan teraziler 10^{-4} hassaslıkta, analizlerde kullanılan potaların ölçüleri ise 2 mm x 8 mm'dir. Bu veriler doğrultusunda, sağlıklı bir DSC analizi için, zemine kuru kütlelerinin %10'u kadar ilave edilen mFDM'nin zemin ile birlikte homojen bir karışım oluşturabilmesi gerekmektedir. Homojen bir karışım için önce temiz bir kağıt üzerinde bir araya getirilen mFDM ve zemin, malzeme kaybı olmadan dikkatli bir biçimde karıştırılmıştır. Elde edilen ~ 7 mg ağırlığındaki zemin ve mFDM karışımı, Şekil 5.1a'daki 10^{-4} hassasiyetindeki bir terazide tartılmış, ardından Şekil 5.1b'deki alüminyum potaya yerleştirilmiş ve DSC cihazına alınarak analizler başlatılmıştır. Analizler, azot gazı altında yapılmış olup, uygulanan sıcaklık aralığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Numune $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 dakika bekletilerek test başlatılmış ve $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Sonrasında numune $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 2 dakika tutulup $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar soğutulmuştur. Isıtma ve soğutma işlemleri $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızda yapılmıştır. Bu prosedür sonunda malzemenin termal özellikleri belirlenmiştir.

mFDM ve likit FDM üzerinde gerçekleştirilen DSC analizleri, P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerine göre çok daha kolaydır. Çünkü ihtiyaç duyulan mFDM, Şekil 5.1a'daki gibi karışım oluşturulmadan direkt olarak Şekil 5.1b'deki alüminyum pota içerisine yerleştirilip, tartılıp, analizleri başlatılmaktadır. Likit FDM de mFDM gibi herhangi bir karışım işlemine tabi tutulmadan direkt olarak Şekil 5.1c'deki gibi şırınga yardımı ile alüminyum pota içerisine yerleştirilip,

tartılıp, analizleri başlatılmaktadır. %5 ve %8 mFDM oranlarındaki katkılı zemin üzerinde DSC analizlerinin gerçekleştirilememesinin tek ve en önemli sebebi, ~7 mg ağırlığında homojen bir karışım oluşturulamamasıdır.

P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen DSC analiz sonucu Şekil 5.2’de ve Tablo 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.2 P10 için DSC analiz sonucu

Tablo 5.1 P10 için DSC analiz sonucu

P10		
	Sıcaklık Aralığı (C°)	-1 ile 0.9 ve 4.6 ile 10
Erime Süreci	Tepe Sıcaklık (C°)	-0.4 ve 7.5
	Erime ısıtı (mJ)	22.61 ve 142.8
	Entalpi (J/g)	5.138 ve 32.46
	Sıcaklık Aralığı (C°)	-4.3 ile 1.8
Katılaşma Süreci	Tepe Sıcaklık (C°)	-0.8
	Erime ısıtı (mJ)	68.42
	Entalpi (J/g)	15.55

Şekil 5.2’de sunulan P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerinde elde edilen ısıtma (yeşil eğri) ve soğutma (mavi eğri) eğrileri, mFDM üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerinden elde edilen ve Şekil 2.27’de sunulan ısıtma ve soğutma eğrilerinden farklı olduğu görülmüştür.

Şekil 5.2’de ve Tablo 5.1’de gösterildiği gibi P10 zeminin aktif olduğu sıcaklık aralıkları endotermik reaksiyon için iki aralık değeri vardır. $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında, ekzotermik reaksiyon için ise $-4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Bununla birlikte $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında %10 mFDM’li karışım, $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik bir tepe faz değişim sıcaklığı (erime noktası) ile katıdan sıvıya bir faz değişimi yaşamıştır. Bu faz değişimi sırasında entalpisi 5.138 J/g ve 32.46 J/g olmuştur. $-4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında %10 mFDM’li karışım $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ bir tepe faz değişim sıcaklığı ile sıvı fazdan katı faza geçmiştir. Bu faz değişimi sırasında entalpisi 15.55 J/g olmuştur. Katıdan sıvıya geçiş sürecinde %10 mFDM’li karışım $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir genlikte erimeyi tamamlarken, sıvı halden katı hale geçişi $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir genlikte olmuştur.

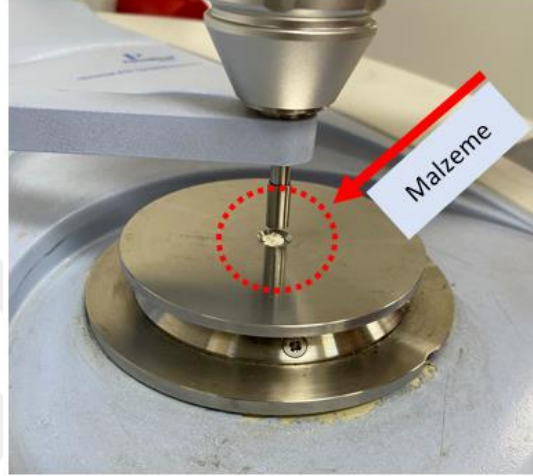
Şekil 2.27 ve Tablo 2.11’de DSC analiz sonuçları verilen mFDM’nin katı maddesi olarak tek faz geçişi vardır. Şekil 5.2’de ve Tablo 5.1’de DSC analiz sonuçları verilen %10 mFDM’li karışımın da sıvıdan katıya geçişte tek bir faz geçişi vardır. Bu tez çalışmasında tercih edilen ve oda sıcaklığında likit halde bulunan parafin bazlı (tetradekan) organik FDM üzerinde gerçekleştirilen DSC analizlerinde, mFDM’nin faz ayrımı olmadan sıvı faza ve tekrar faz ayrımı olmadan katı faza geçebilmesi ve bu durumun sürekliliği, çalışma prensibi açısından oldukça avantaj sağlamıştır (Sharma vd., 2007; Feldman vd., 1986; Xiao vd., 2002; Bugaje, 1997). Bu da, seçilen mFDM’nin donma çözülme sınır sıcaklık değerleri arasında çalışmaya oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.

5.2 Elementel Analizler

Bu tez çalışmasında kullanılan MH zeminin elementel kompozisyonu ve mineralojik verilerinin tayin edilmesi amacıyla zemin üzerinde XRF ve XRD analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler Şekil 2.5’te detaylı bir biçimde sunulmuştur. Yapılan XRF analizi sonucunda zemin içerisinde $45.978\text{ }\text{Al}_2\text{O}_3$, $52.303\text{ }\text{SiO}_2$, $0.378\text{ }\text{K}_2\text{O}$, $0.123\text{ }\text{CaO}$, $0.787\text{ }\text{TiO}_2$, $0.359\text{ }\text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşiklerine rastlanmıştır. Yapılan XRD analizi sonucunda ise zemin içerisinde kaolin (%89), kuvars (%4), feldspat (%4) ve illit-montmorillonit (%3) mineralleri görülmüştür.

Sadece zemin üzerinde gerçekleştirilen XRD ve XRF analizlerine ek olarak, zemin, mFDM ve tüm katkı oranları (P5, P8, P10) üzerinde malzemelerin kimyasal

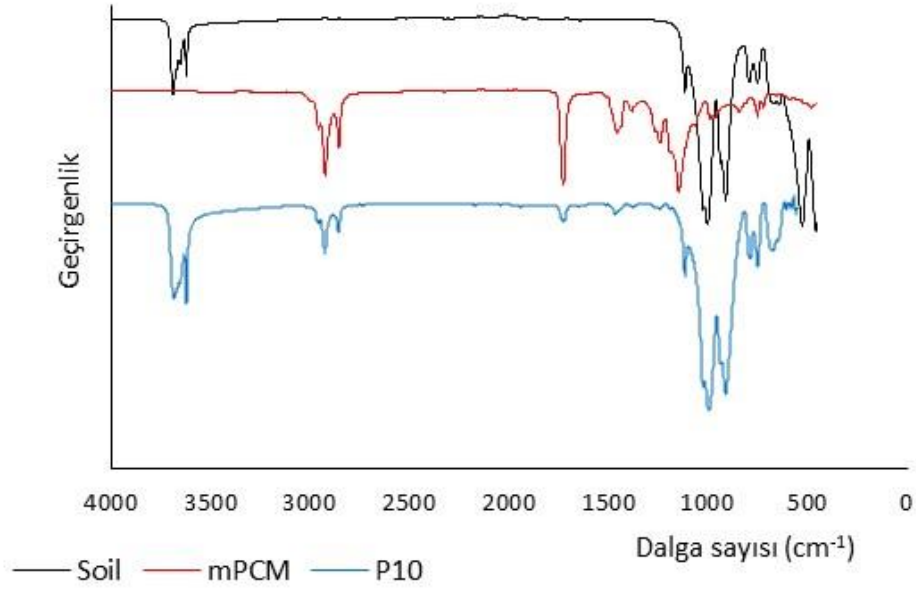
yapılarını atomların titreşimlerine bağlı olarak belirleyen ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi veren FT-IR analizinin yaptırılması planlanmıştır. Ancak, FT-IR analizlerinin yapılma aşamasında karşılaşılan zorluklar sebebi ile sadece %10 katkı oranı için analizler gerçekleştirilebilmiş, %5 ve %8 katkı oranları için FT-IR analizleri gerçekleştirilememiştir. Toz halindeki mFDM, zemin ve P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen FT-IR analizlerinde izlenen adımları Şekil 5.3'te sunulmuştur.



Şekil 5.3 FT-IR analiz adımları

Sağlıklı bir FT-IR analizi için, DSC analizinde olduğu gibi, zemine kuru kütlelerinin %10'u kadar ilave edilen mFDM'nin zemin ile birlikte homojen bir karışım oluşturabilmesi gerekmektedir. Homojen bir karışım için önce temiz bir kağıt üzerinde bir araya getirilen mFDM ve zemin, malzeme kaybı olmadan dikkatli bir biçimde karıştırılmıştır. Elde edilen zemin ve mFDM karışımı, Şekil 5.1a'daki 10^{-4} hassasiyetindeki bir terazide tartılmış, ardından Şekil 5.3'teki FT-IR cihazına alınarak analizler başlatılmıştır.

mFDM ve MH zemin üzerinde gerçekleştirilen FT-IR analizleri, P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen FT-IR analizlerine göre çok daha kolaydır. Çünkü ihtiyaç duyulan mFDM, Şekil 5.1a'daki gibi karışım oluşturulmadan direkt olarak Şekil 5.3'teki FT-IR cihazına yerleştirilip, analizleri başlatılmaktadır. %5 ve %8 mFDM oranlarındaki katkılı zemin üzerinde FT-IR analizlerinin gerçekleştirilememesinin tek ve en önemli sebebi, ~ 3 mg ağırlığında homojen bir karışım oluşturulamamasıdır. P10, mFDM ve zemin üzerinde gerçekleştirilen FT-IR analiz sonucu Şekil 5.4'te sunulmuştur.



Şekil 5.4 P10, mFDM ve zemin için FT-IR analiz sonucu

Şekil 2.5'te sunulan XRD ve XRF analiz sonuçları ile zeminin kaolinit yapısında olduğu belirlenmiştir. Kimyasal formülü $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ olan kaolinit yapıları silikat esaslı malzemelerdir. Şekil 2.5'te verilen XRD analiz sonuçlarında görüldüğü üzere zemin, Al_2O_3 ve SiO_2 den meydana gelmiştir. Doğal zemin olduğu için de içerisinde %1,719 K, Ca, Ti ve Fe oksitleri de bulunmaktadır. Bu elementler Si-O-Al, Si-O-Ti, Si-O-Fe yapısında bağlar oluşturmaktadır. Şekil 5.4'te sunulan FT-IR spektrumunda da MH zeminin 3600 cm^{-1} 'de (3651, 3619, 3685) görülen pikleri kaolinit yapısındaki OH gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. 1000 cm^{-1} 'de (1147, 1024, 1001) görülen pikler Si-O, 550 cm^{-1} 'deki pikler Al-O, 495 cm^{-1} 'de görülen pikler Ti-O ve 580 cm^{-1} 'deki pikler ise Fe-O gerilme frekanslarına aittir. $500 - 100 \text{ cm}^{-1}$ deki pikler kaolinit içinde yer alan Si, Al, K, Ca, Ti ve Fe'nin oksijen ile olan etkileşim frekanslarıdır. FT-IR spektrumları ve XRD analiz sonuçları birbirini desteklemektedir.

Çalışmada kullanılan ve genel formülü $(\text{C}_n\text{H}_{2n+2})$ olan organik esaslı tetradekan yapısındaki mFDM'nin Şekil 5.4'te sunulan FT-IT spekturumunda, CH gerilme frekansları ve CH bükülme frekanslarını temsil eden spektrumlar mevcuttur. mFDM'nin FT-IR spektrumunda 2938 cm^{-1} 'deki pik CH, 2922 cm^{-1} 'deki pik CH_3 , 2853 cm^{-1} 'deki pik CH_2 gruplarının C-H gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. 1454 cm^{-1} CH bükülmesi, 1381 cm^{-1} metil grupları bükülmesi, 1450 cm^{-1} C-H bükülmesi,

700 cm⁻¹ de aynı pikin bükülme frekansısıdır. Spektrumda ayrıca 1726 cm⁻¹ de keskin bir pik yer almaktadır. Bu pik PCM sentezinde kaynaklı bir karbonil piktir.

P10 zeminin Şekil 5.4'te sunulan FT-IR spekturumunda zemine ait pikler ile PCM'den kaynaklı pikler (1726 cm⁻¹) mevcuttur. Spektrumda mFDM ile zeminin kimyasal bir etkileşimde bulunmadığı, sadece tabakalı bir yapıya sahip olan silikat malzemenin içine nanoküre yapısındaki FDM'nin yerleştiği sonucuna varılmıştır. Böylece, farklı fonksiyonel gruplara ve kimyasal bağlara sahip atomlar FT-IR spektroskopisi ile belirlenmiştir.

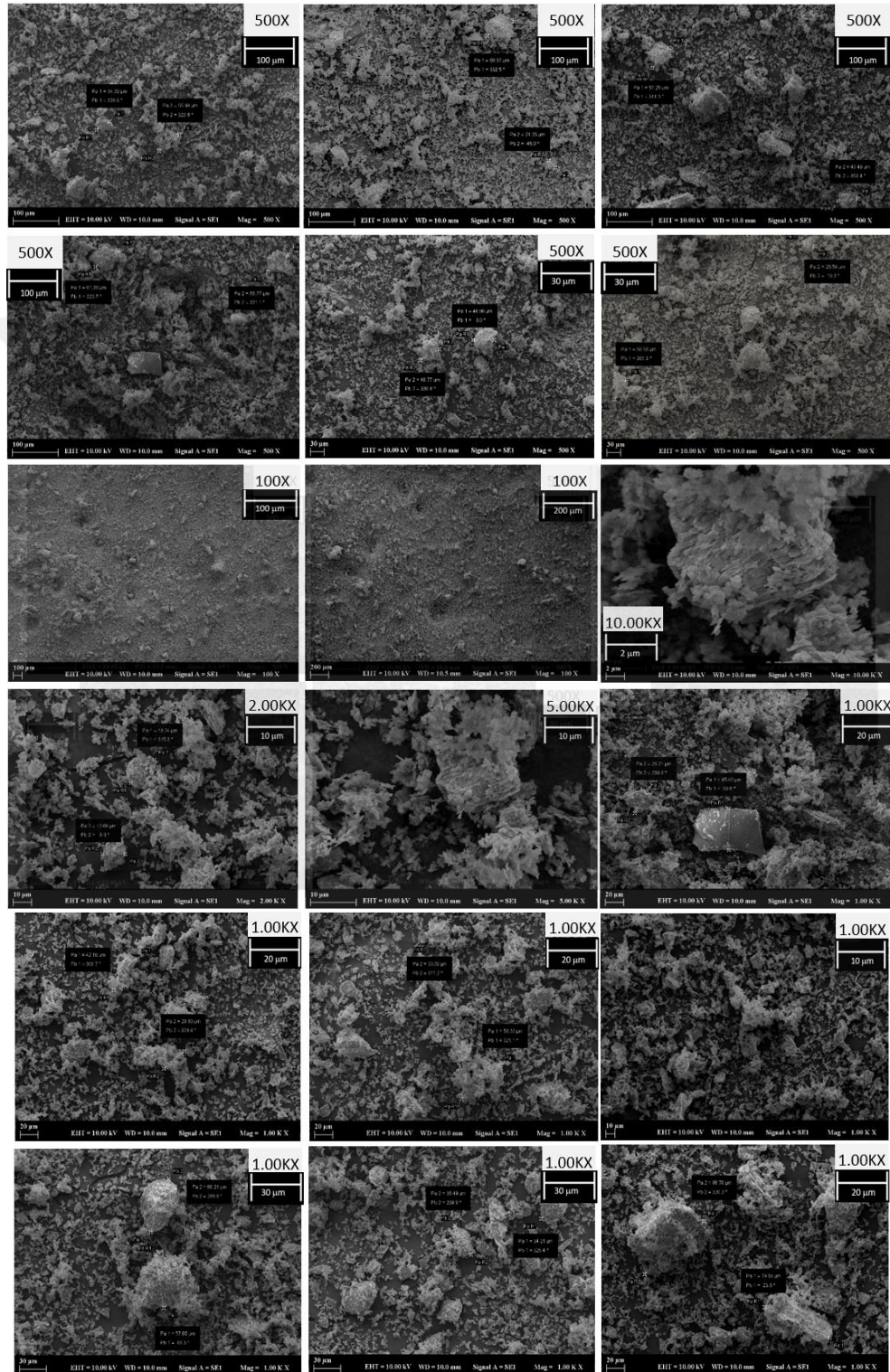
XRD, XRF ve FT-IR analizleri ile mFDM, zemin ve P10 zeminin içerdiği atomlar, kimyasal bağlar, elementler ve minerallerin bilgileri elde edilmiştir. Tüm bunlara ilave olarak mFDM'nin yeraltı suyuna karıştığında suyu kirleticiliği, suya ağır metalleri verip vermeyeceği, verecek ise bunların yüzdelерinin belirlenebilmesi amacıyla mFDM üzerinde katı ve sıvı örneklerdeki elementlerin kalitatif ve kantitatif olarak belirlenmesini sağlayan ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer, İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometre) analizi yaptırılmıştır. Tablo 5.2'de mFDM üzerinde gerçekleştirilen ICP-MS sonuçları sunulmuştur.

Tablo 5.2 ICP-MS analiz sonuçları

<i>Element</i>	<i>Miktarı (µg/g)</i>	<i>Element</i>	<i>Miktarı (µg/g)</i>
Na	1005 ± 73	Fe	32.75 ± 0.49
Mg	11.77 ± 0.72	Co	0.13 ± 0.01
Al	32.43 ± 2.16	Ni	0.87 ± 0.02
K	10.85 ± 0.37	Cu	0.98 ± 0.03
V	0.053 ± 0.002	Zn	8.51 ± 0.24
Cr	1.01 ± 0.02	Sr	1.64 ± 0.03

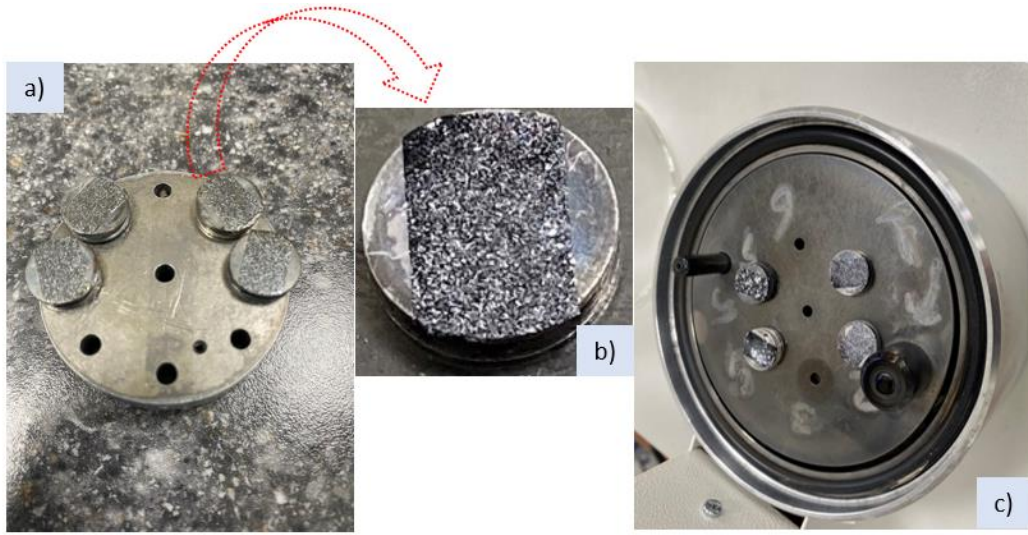
5.3 Görüntü Analizleri

Bu tez çalışmasında kullanılan MH zeminin numune yüzeyinin görüntüsünü elde edebilmek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiş, farklı büyütmelerde ve farklı ölçeklerde elde edilen veriler Şekil 5.5'te detaylı bir biçimde sunulmuştur.



Şekil 5.5 Zemin için SEM analiz sonuçları

Sadece zemin üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerine ek olarak, mFDM ve tüm katkı oranları (P5, P8, P10) üzerinde malzemeleri yüzey görüntülerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, DSC ve FT-IR analizlerinin yapılma aşamasında da karşılaşılan zorluklar, SEM analizleri için numune hazırlanması sırasında da meydana gelmiştir. %5 ve %8 mFDM oranlarındaki katkılı zemin üzerinde SEM analizlerinin gerçekleştirilememesinin tek ve en önemli sebebi Şekil 5.6'daki bantlara yapışabilecek miktarda homojen bir karışım oluşturulamamasıdır. Bu sebeple sadece %10 katkı oranı için analizler gerçekleştirilebilmiştir. Toz halindeki mFDM ve P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerinde izlenen adımlar Şekil 5.6'da sunulmuştur.

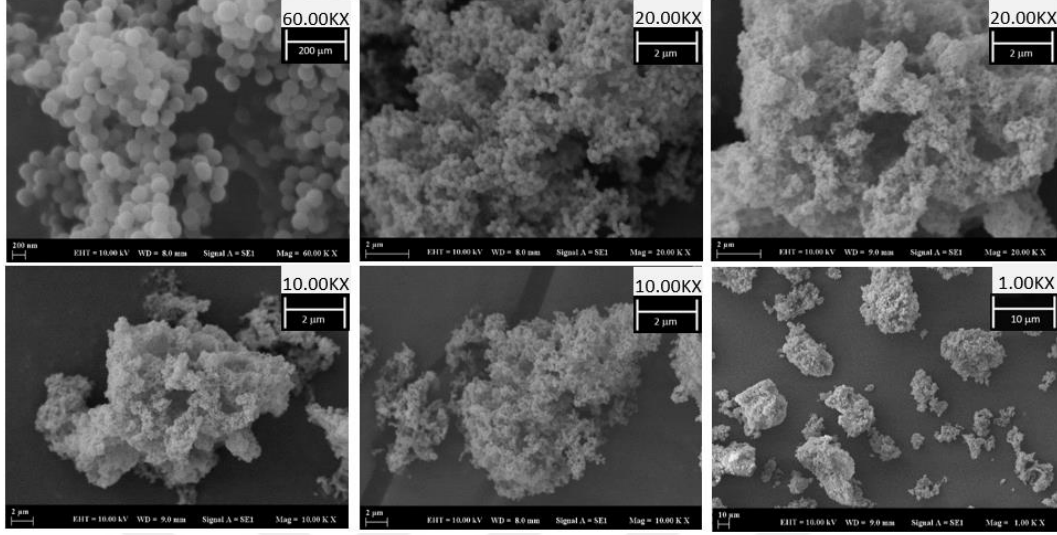


Şekil 5.6 SEM analiz adımları

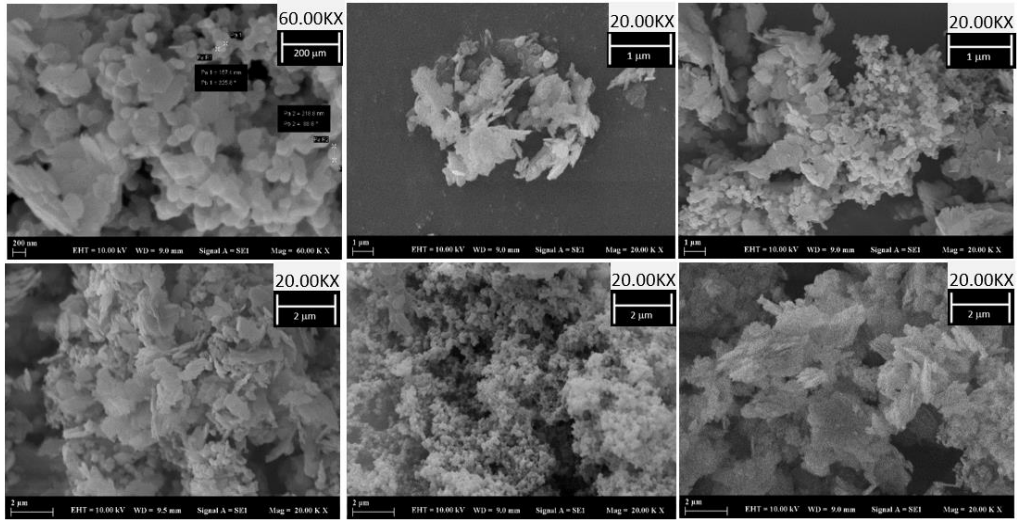
Sağlıklı bir SEM analizi için, DSC ve FT-IR analizinde olduğu gibi, zemine kuru kütlelerinin %10'u kadar ilave edilen mFDM'nin zemin ile birlikte homojen bir karışım oluşturabilmesi gerekmektedir. Homojen bir karışım için önce temiz bir kağıt üzerinde bir araya getirilen mFDM ve zemin, malzeme kaybı olmadan dikkatli bir biçimde karıştırılmıştır. Elde edilen zemin ve mFDM karışımı, Şekil 5.6a ve Şekil 5.6b'deki gibi yapışkan bantlar üzerine yerleştirilmiş, ardından Şekil 5.6c'deki hücrene alınarak analizler başlatılmıştır.

mFDM ve MH zemin üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri, P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerine göre çok daha kolaydır. Çünkü ihtiyaç duyulan mFDM, Şekil 5.6a'daki yerleşim yerine direkt olarak konulup, Şekil 5.6c'deki hücrene yerleştirilip, analizleri başlatılmaktadır. %5 ve %8 mFDM oranlarındaki

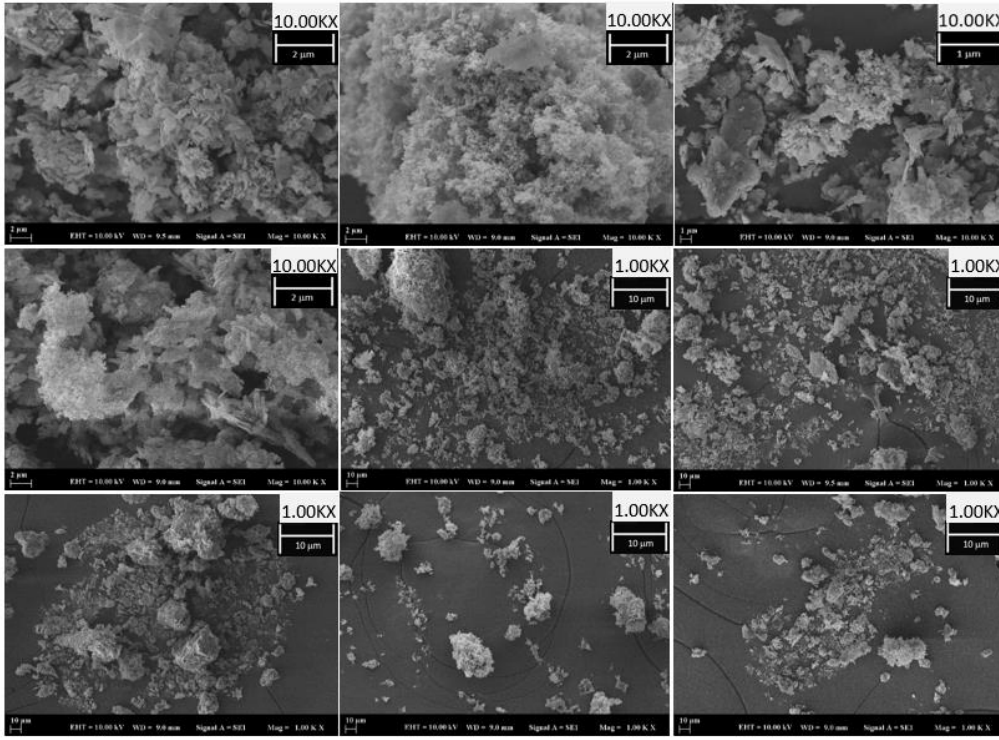
katkılı zemin üzerinde SEM analizlerinin gerçekleştirilememesinin tek ve en önemli sebebi, homojen bir karışım oluşturulamamasıdır. P10 ve mFDM üzerinde gerçekleştirilen SEM analiz sonucu sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.7 mFDM için SEM analiz sonuçları



Şekil 5.8 P10 için SEM analiz sonuçları



Şekil 5.8 P10 için SEM analiz sonuçları (devamı)

Şekil 5.5'te sunulan SEM analiz görüntülerinde, MH zeminin tabakalı bir yapıya sahip olduğu, tabakalar arasında boşlukların olduğu, dane boyutlarının değişken olduğu ve zeminin homojen olmadığı belirlenmiştir. Zemin yüzeyinde pürüzlülüklerin mevcut olduğu, belli bölgelerde kümeleşmelerin olduğu ve kümeleşen grupların şeklinin küresel yapıya yakın ancak boyutlarının 12,66 µm ile 61,36 µm aralığında değişim gösterdiği, 10000 büyütmede kümeleşmiş yapıların da tabakalar şeklinde olduğu belirlenmiştir. Zeminin dane boyutlarının geniş bir aralıkta değiştiği, dane boyutlarında homojenlik olmadığı görülmüştür.

Şekil 5.6'da mFDM'in küresel ve homojen yapıya sahip olduğu, yüzeyinde herhangi bir çatlak ya da oyuk olmadığı, tanecikler arasında kümeleşmelerin olduğu ancak yapının son derece homojen olduğu belirlenmiştir. Kümelerin iç içe geçmiş küresel yapılardan oluştuğu, küresel topluluklar arasında tünel şeklinde boşlukların mevcut olduğu, tane boyutlarının da homojenliği gözlemlenmiştir. mFDM'nin partikül boyutlarının zeminin dane boyutuna göre oldukça küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.7'de ise P10 zeminde, tabakalı yapıya sahip olan zemin içine küresel mFDM yapılarının girdiği ve küreselliğin bir miktar bozulduğu görülmüştür. Kaolinit yapısındaki zemin dane boyutları ortalama 50 µm mertebesindeyken, mFDM ile

kariştırıldığında tanecik boyutunun nm seviyelerine indiği gözlemlenmiştir. Ancak mFDM'in küresel yapılarının çapları en fazla 50 nm civarında iken zemin içinde görölen küresel yapılar 150-220 nm boyutlarına gelmiştir. Katkı malzemesinin zemine eklenmesi ile tanecik boyutunun ana malzemeye göre daha küçüldüğü görölmüştür.

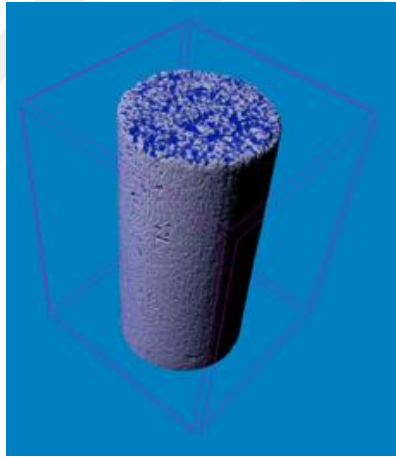
şekil 5.6, şekil 5.7 ve şekil 5.8'de, D çevrimlerine maruz kalmayan mFDM'nin, katkısız (P0) ve katkılı (P10) zeminin yüzey ve tabaka görüntüleri sunulmuştur. D çevrimlerine maruz kalan P0 ve P10 zeminin görüntüleri ise Micro-CT analizleri ile incelenmiştir. D çevrimlerine maruz kalan zeminin görüntülerinin incelenmesi, zeminin boşluk yapısının D çevrimlerinden etkilenme derecesinin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçla, Tablo 2.3'teki optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan katkısız (P0) ve katkılı (P10) zemin üzerinde 11 D çevrimi uygulanmış, ardından Micro-CT analizleri gerçekleştirilmiştir. %10 katkı oranının seçilme sebebi, performans açısından en iyi davranışı gösteren katkı oranı olmasıdır. 11 D çevriminin seçilme sebebi ise numunelerin en uzun çevrime maruz bırakıldığı, en büyük mukavemet kayıplarının meydana geldiği, en olumsuz durumu temsil etmesidir. 11 D çevrimine maruz kalan zeminin boşluk yapısında meydana gelen değişimlerin incelenmesinde SEM analizlerinin yeterli olmayacağı düşünüldüğünden Micro-CT taraması yapılmıştır. Micro CT taraması, daha yüksek çözünürlükte, tahribatsız bir şekilde 3 boyutlu (3D) görüntü tekniğidir. SEM analizleri P0-0 ve P0-11 zemin için, Micro-CT analizleri ise P0-11 ve P10-11 zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Micro-CT taraması 3 boyutlu görüntüleme tekniği olduğundan, aynı analizler P0-0 ve P10-0 zemin üzerinde de gerçekleştirilerek, D çevrimlerinin zeminin boşluk yapısında meydana getirdiği değişimler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Micro-CT ölçümleri için, Tablo 2.3'te belirtilen 2. prosedür baz alınmış, P0 ve P10 zemin, şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te belirlenen optimum su muhtevası değerinde ve standart kompaksiyon enerjisinde şekil 2.9'daki gibi sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan şekil 2.11'deki gibi 3,5 cm x 7 cm ebatlarında numuneler alınmıştır. Hazırlanan serbest basınç deney numunelerinin ilgili donma çözölme çevrimlerini tamamlamasının akabinde görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir. Görüntü analizleri şekil 5.9'daki gibi Newton 5G (Cefla) tomografi cihazında yapılmıştır.



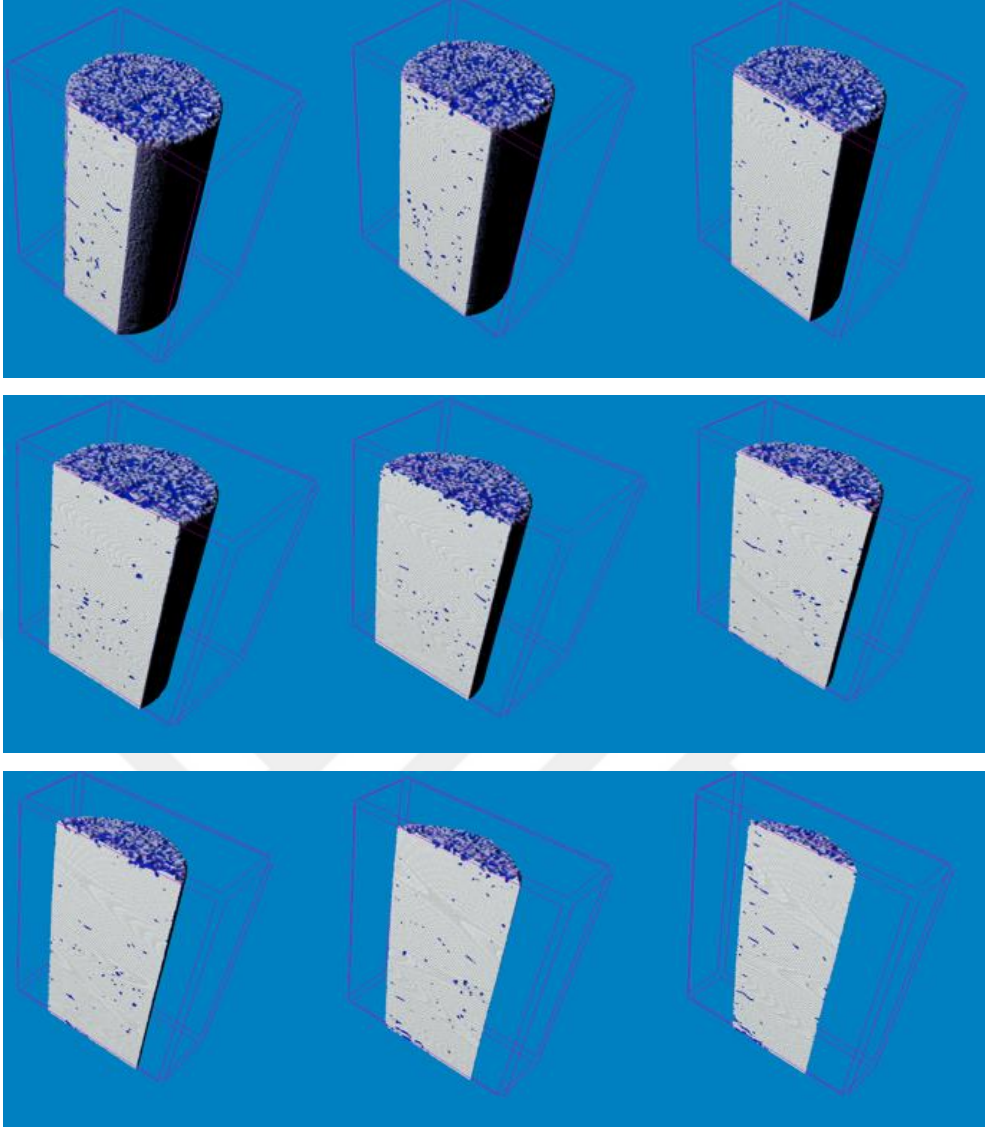
Şekil 5.9 Micro CT analizleri yapımı

Şekil 5.9'daki gibi tomografi cihazına yerleştirilen numunelerin Micro CT taramaları yapılmıştır. Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmayan katkısız zemin (P0-0) üzerinde gerçekleştirilen Micro CT tarama sonuçları Şekil 5.10-Şekil 5.12'de sunulmuştur. Şekil 5.10'da P0-0 zeminin 3D görüntüsü, Şekil 5.11'de P0-0 zeminin boydan kesit alınması ile elde edilen görüntüleri, Şekil 5.12'de P0-0 zeminin enden kesit alınması ile elde edilen görüntüleri sunulmuştur.

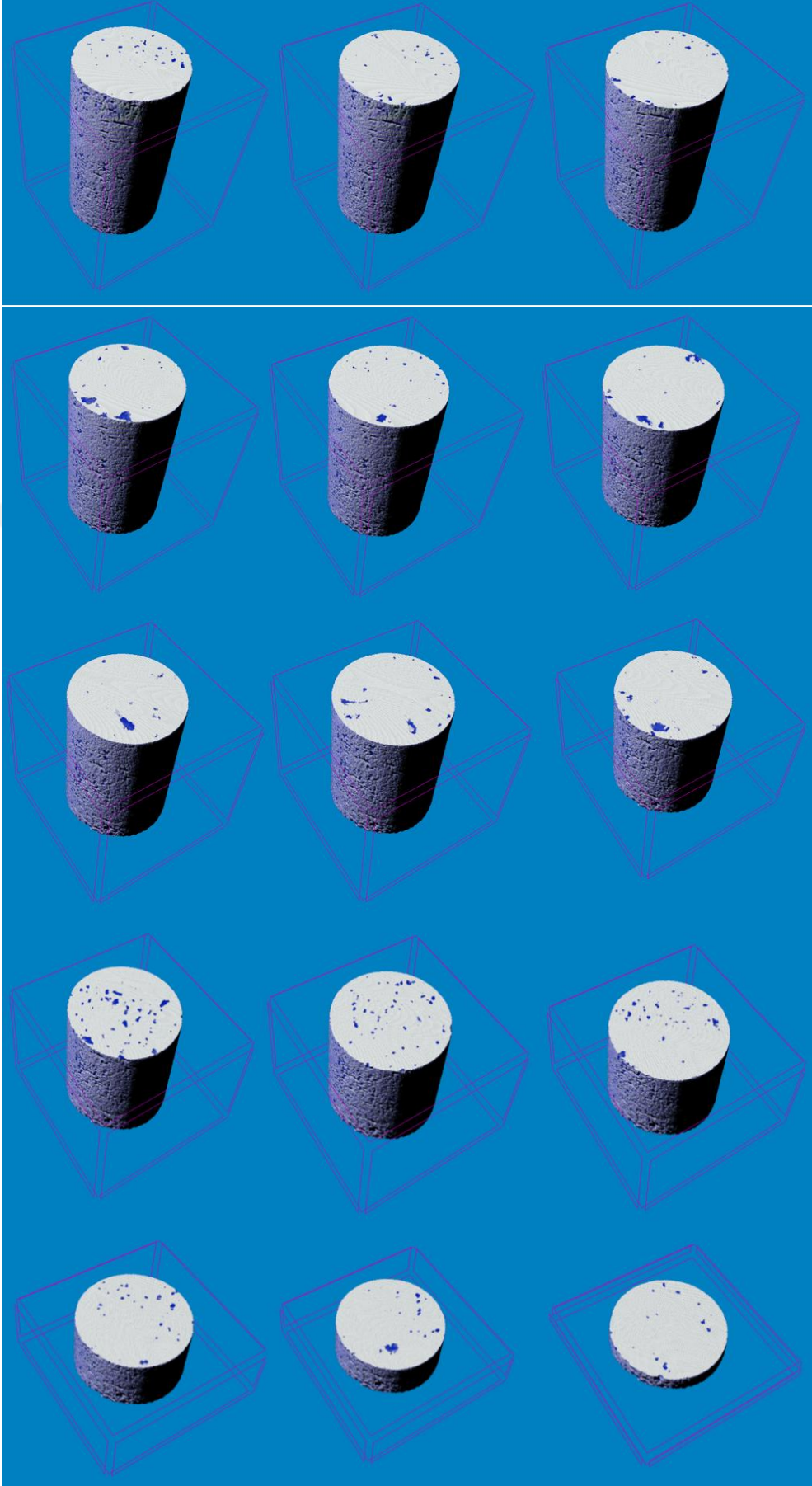


Şekil 5.10 P0-0 zemin 3D görüntüsü

Şekil 5.10-Şekil 5.12'de mavi renkler zemin boşluklarını, gri renkler ise zemin danelerini temsil etmektedir. P0-0 zemin donma çözülme çevrimlerine maruz kalmadan, hazırlandığı anda parçalanmaması ve zarar görmemesi için strech filme sarılarak görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir.



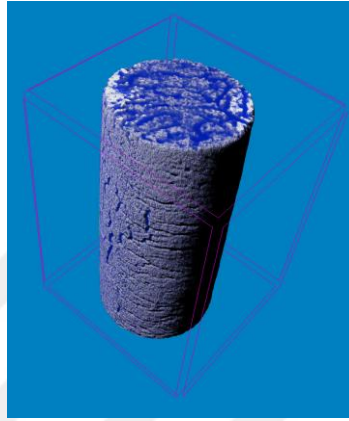
Şekil 5.11 P0-0 zemin boy kesiti 3D görüntüleri



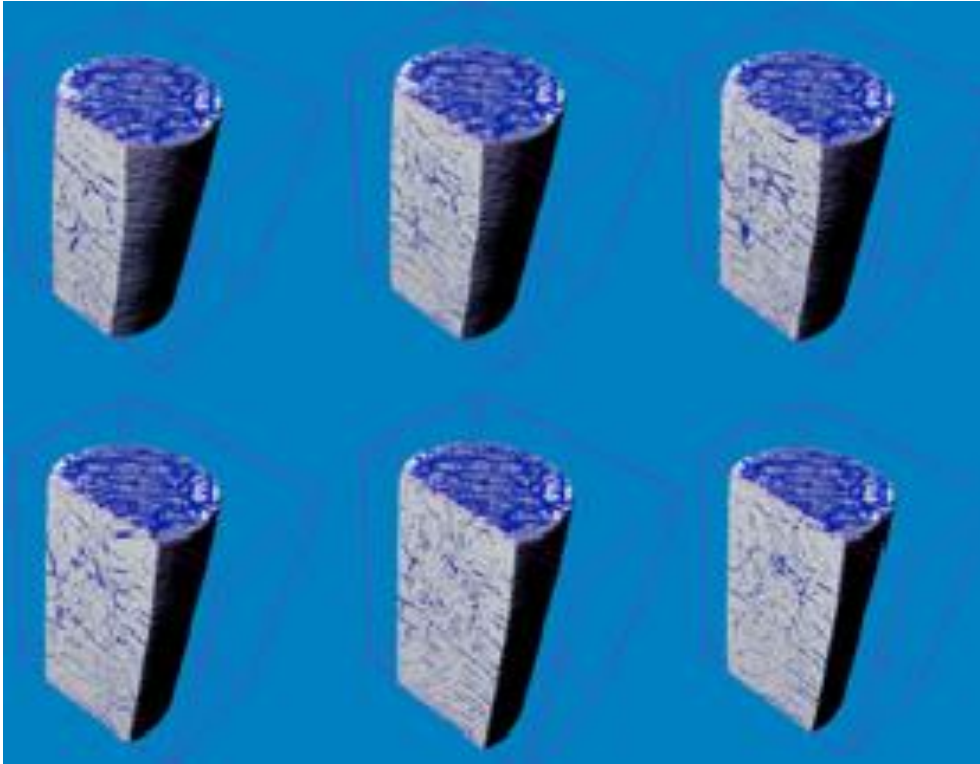
Şekil 5.12 P0-0 zemin en kesiti 3D görüntüleri

Şekil 5.10 ve Şekil 5.12’de yer alan görüntülerde donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan katkısız zeminin boşluk ve dane yapısı gözlemlenmiştir.

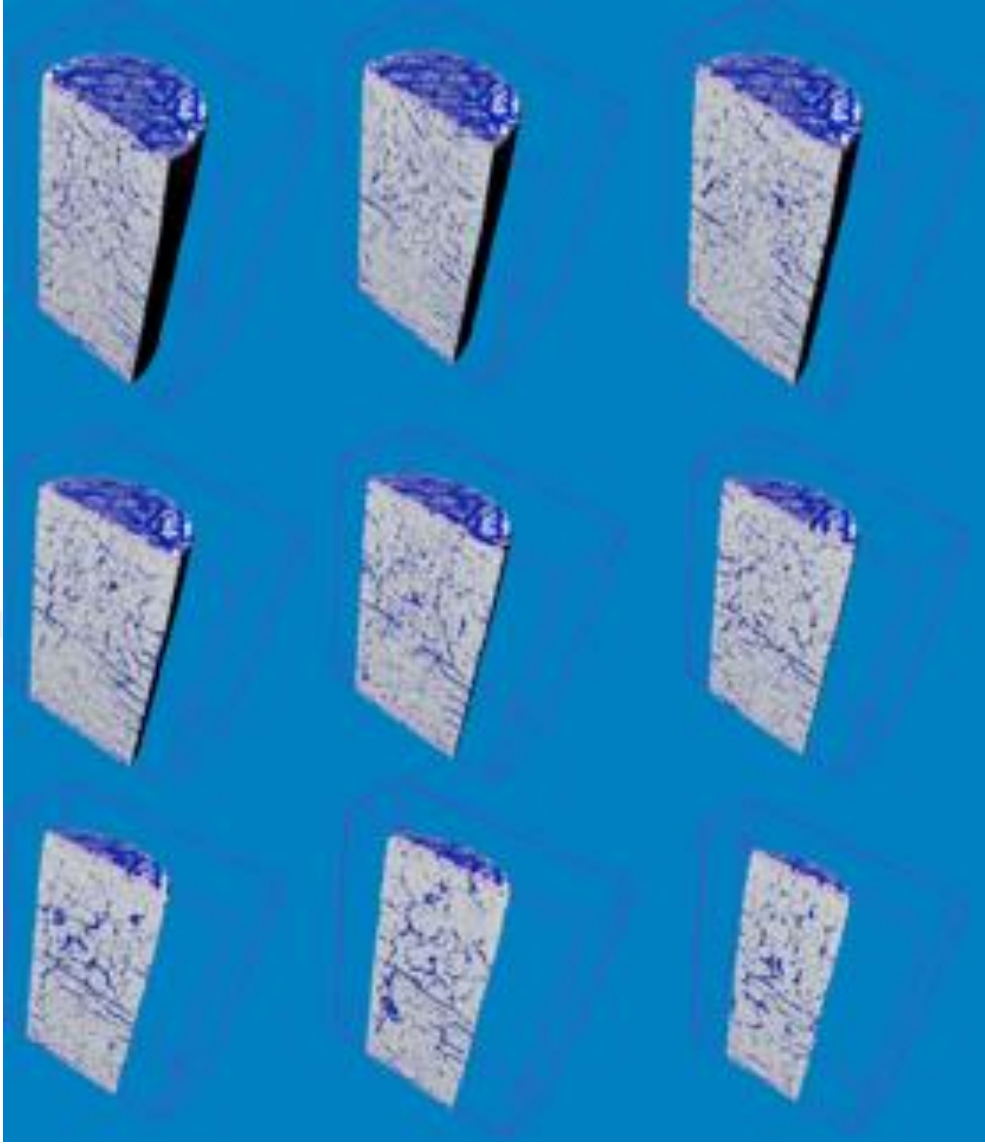
11 donma çözülme çevrimine maruz bırakılan katkısız zemin (P0-11) üzerinde gerçekleştirilen Micro CT tarama sonuçları Şekil 5.13-Şekil 5.15’te sunulmuştur. Şekil 5.13’te P0-11 zeminin 3D görüntüsü, Şekil 5.14’te P0-11 zeminin boydan kesit alınması ile elde edilen görüntüleri, Şekil 5.15’te P0-11 zeminin enden kesit alınması ile elde edilen görüntüleri sunulmuştur. Şekil 5.13-5.15’te mavi renkler zemin boşluklarını, gri renkler ise zemin danelerini temsil etmektedir.



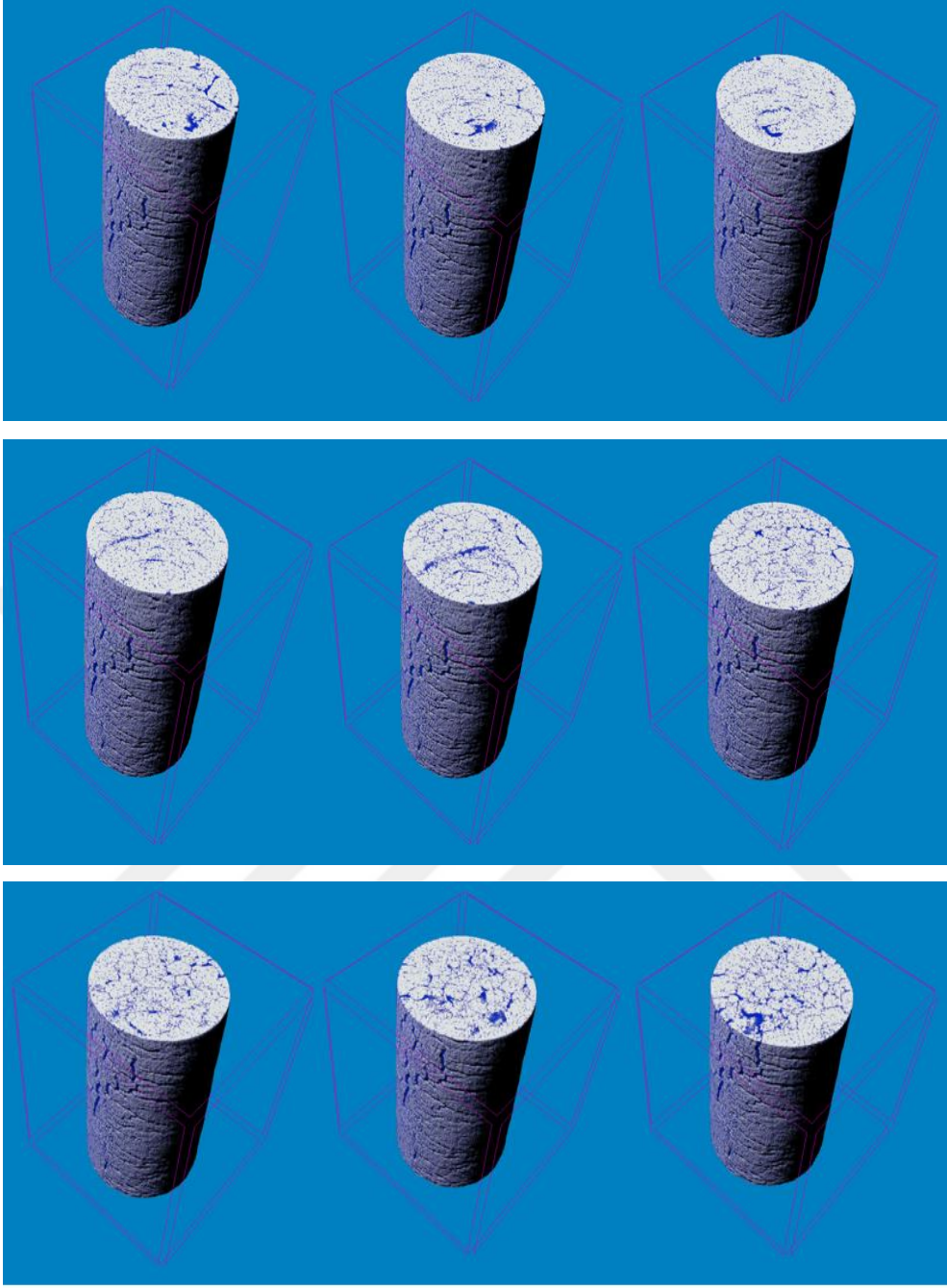
Şekil 5.13 P0-11 zemin 3D görüntüsü



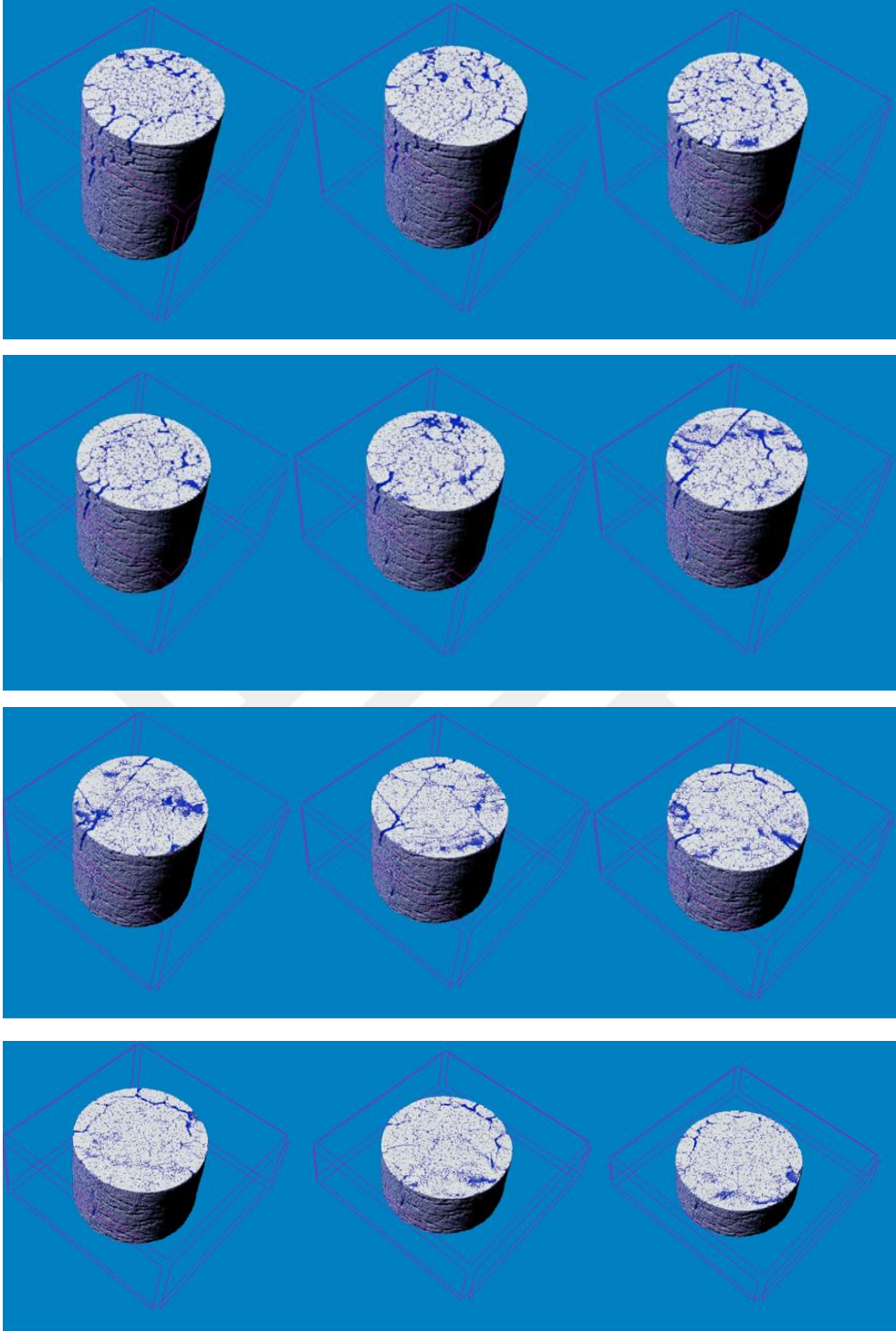
Şekil 5.14 P0-11 zemin boy kesiti 3D görüntüleri



Şekil 5.14 P0-11 zemin boy kesiti 3D görüntüleri (devamı)



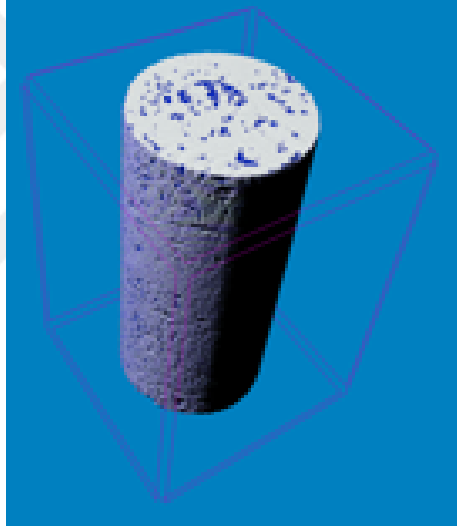
Şekil 5.15 P0-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri



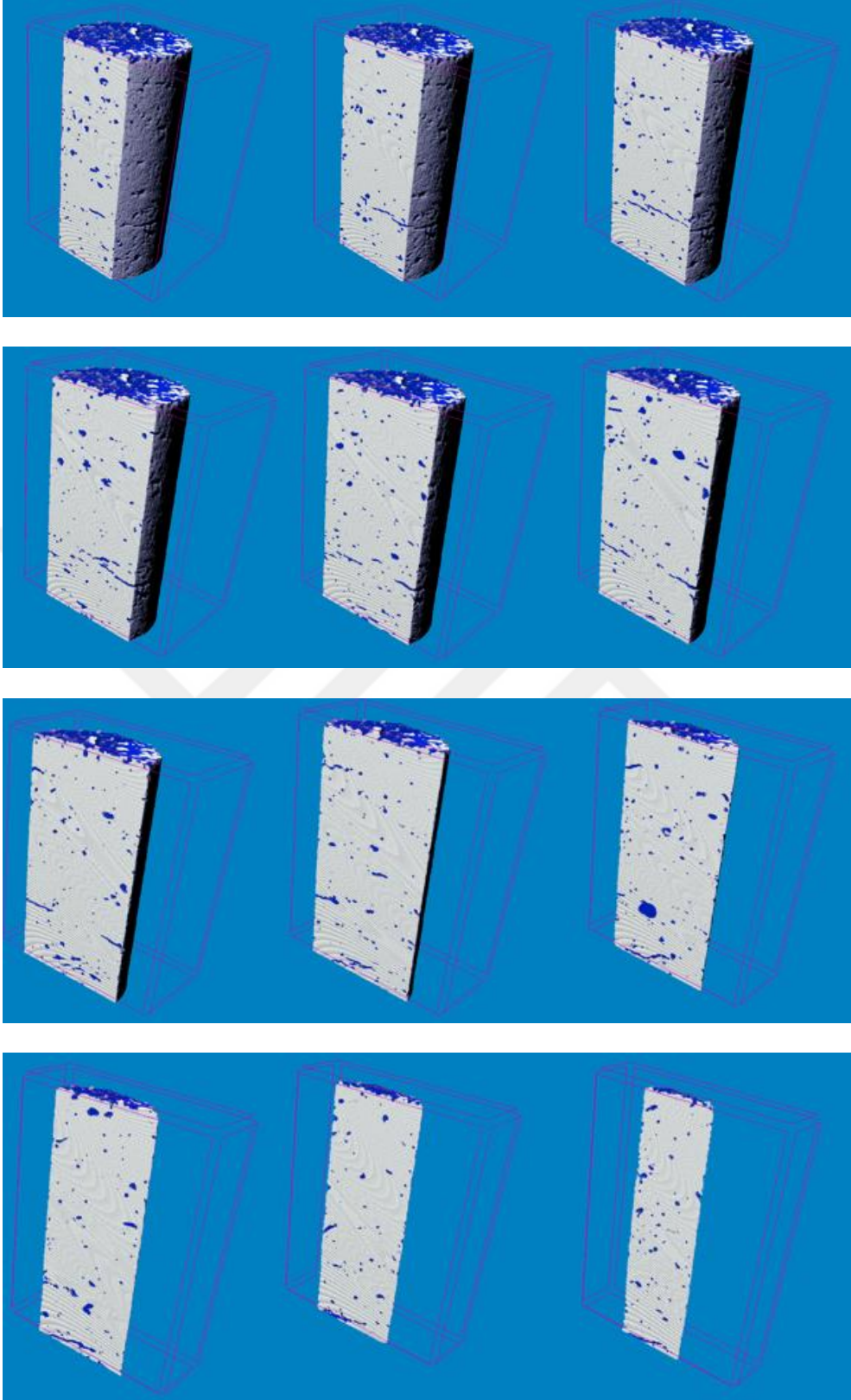
Şekil 5. 15 P0-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri (devamı)

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan P0 zeminin boy ve en kesit görüntüleri, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te 11 donma çözülme çevrimine maruz kalan P0 zeminin boy ve en kesit görüntüleri sunulmuştur. Elde edilen görüntüler karşılaştırıldığında donma ve çözülme çevrimlerinin zeminin boşluk yapısını büyük ölçüde etkilediği görülmektedir.

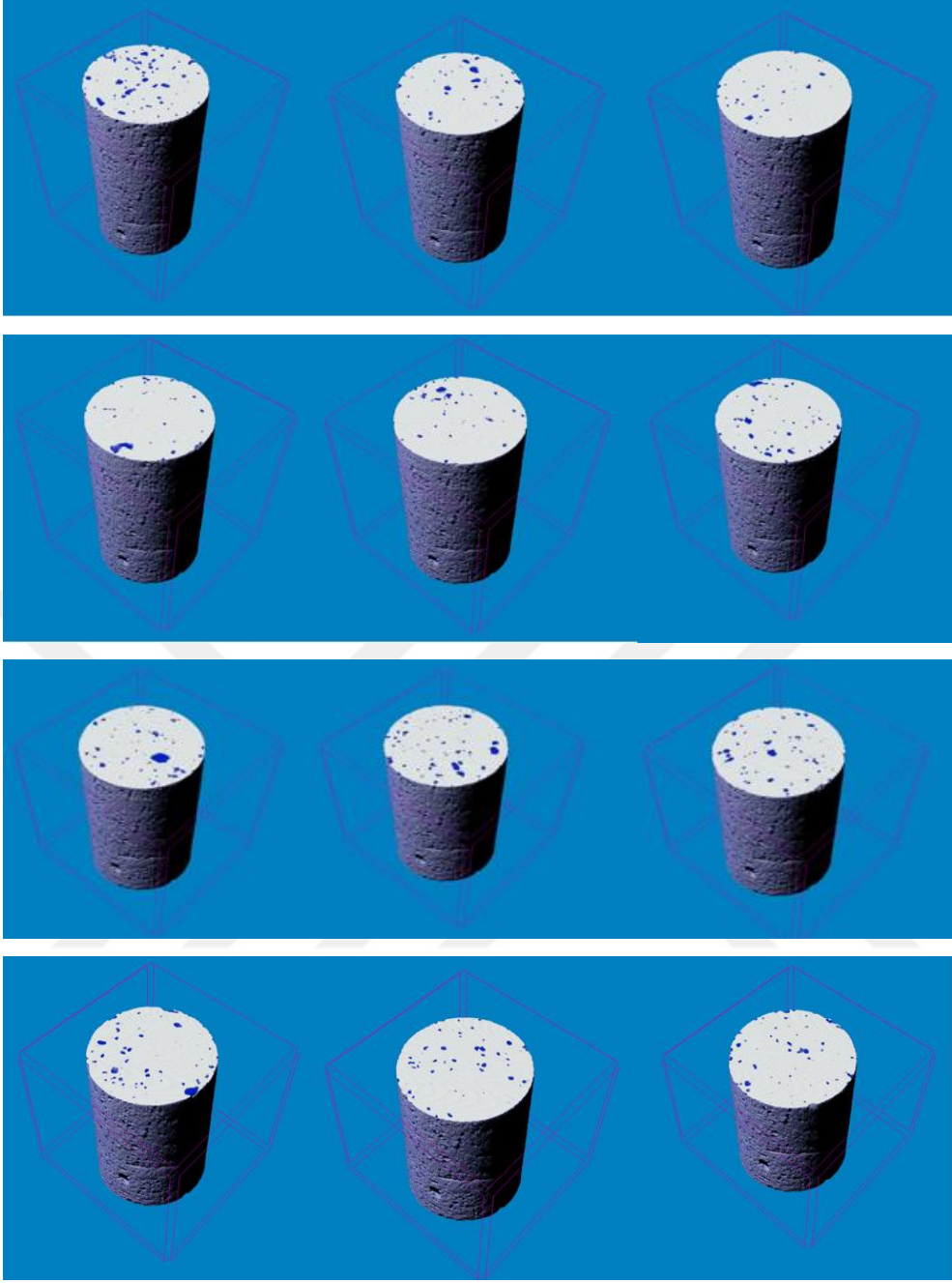
Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmayan katkılı zemin (P10-0) üzerinde gerçekleştirilen Micro CT tarama sonuçları Şekil 5.16-Şekil 5.18’de sunulmuştur. Şekil 5.16’da P10-0 zeminin 3D görüntüsü, Şekil 5.17’de P10-0 zeminin boydan kesit alınması ile elde edilen görüntüleri, Şekil 5.18’de P10-0 zeminin enden kesit alınması ile elde edilen görüntüleri sunulmuştur. Şekil 5.16-Şekil 5.18’de mavi renkler zemin boşluklarını, gri renkler ise zemin ve mFDM karışımını temsil etmektedir.



Şekil 5.16 P10-0 zemin 3D görüntüsü



Şekil 5.17 P10-0 zemin boy kesiti 3D görüntüleri



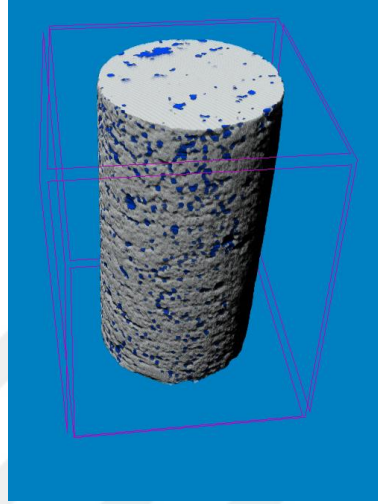
Şekil 5.18 P10-0 zemin en kesiti 3D görüntüleri



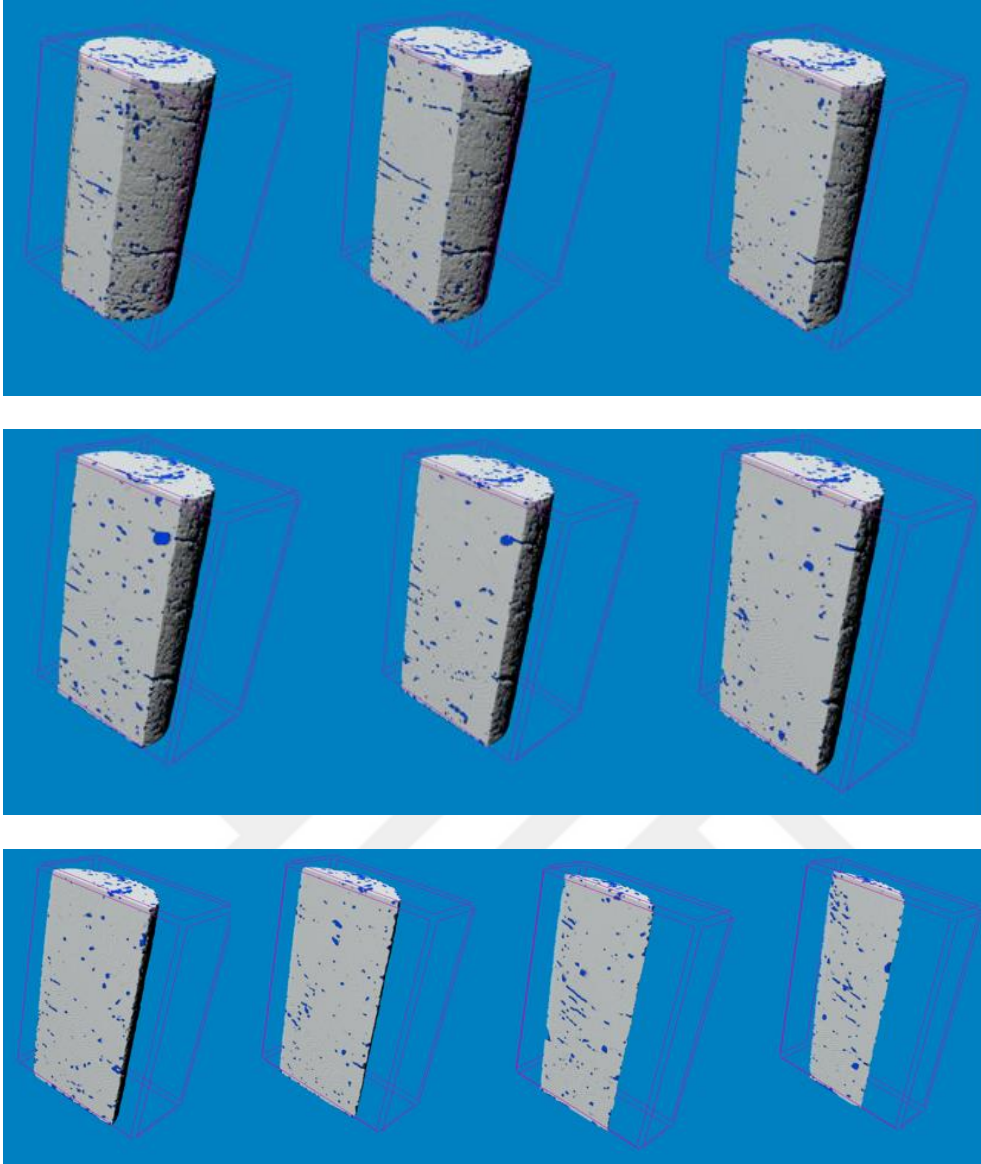
Şekil 5.18 P10-0 zemin en kesiti 3D görüntüleri (devamı)

Şekil 5.16 ve Şekil 5.18’de yer alan görüntülerde donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan katkılı zeminin boşluk ve dane yapısı gözlemlenmiştir.

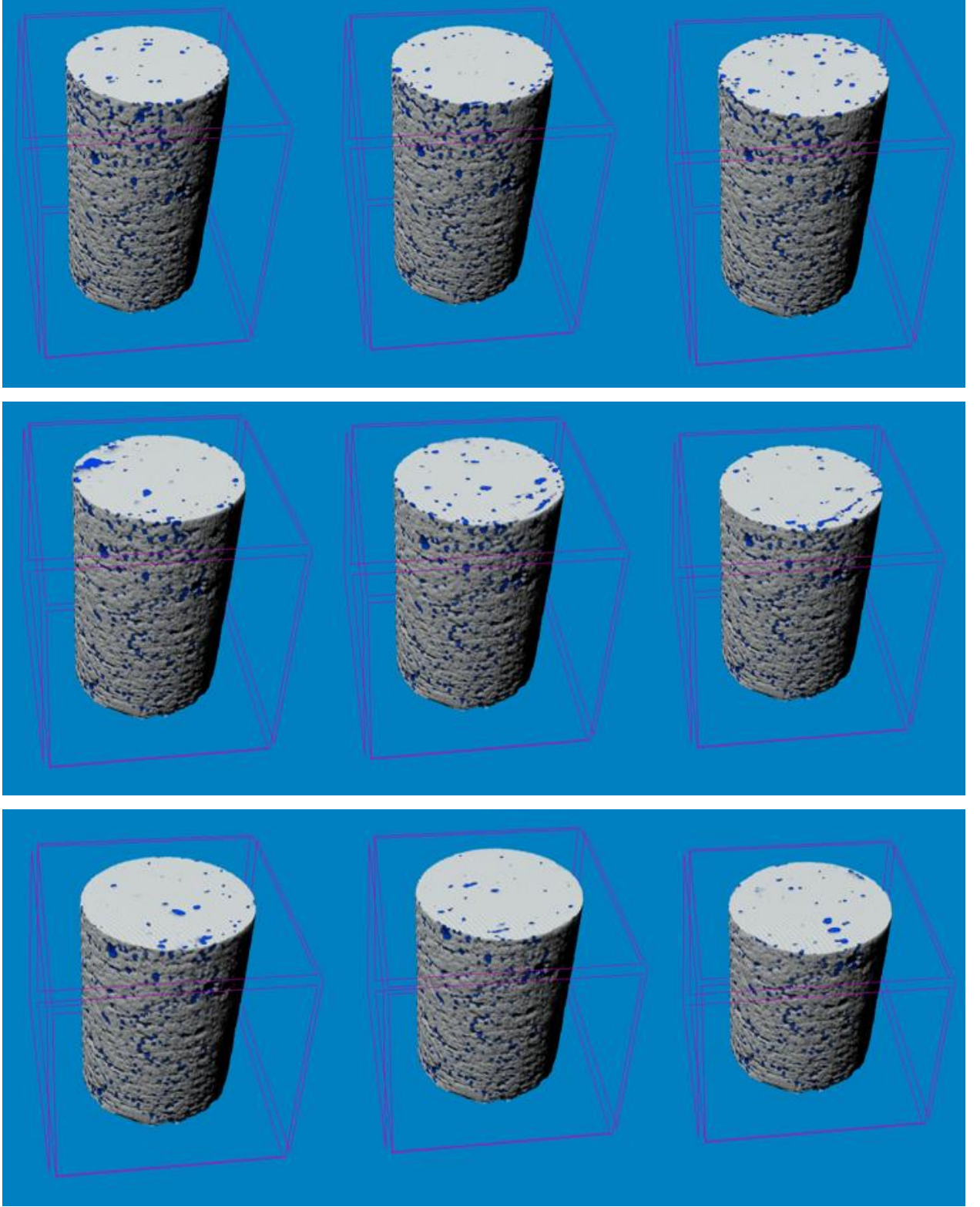
11 donma çözölme çevrimine maruz bırakılan katkılı zemin (P10-11) üzerinde gerçekleştirilen Micro CT tarama sonuçları Şekil 5.19-Şekil 5.21’de sunulmuştur. Şekil 5.19’da P10-11 zeminin 3D görüntüsü, Şekil 5.20’de P10-11 zeminin boydan kesit alınması ile elde edilen görüntüleri, Şekil 5.21’de P10-11 zeminin enden kesit alınması ile elde edilen görüntüleri sunulmuştur. Şekil 5.19-Şekil 5.21’de mavi renkler zemin boşluklarını, gri renkler ise zemin ve mFDM karışımını temsil etmektedir.



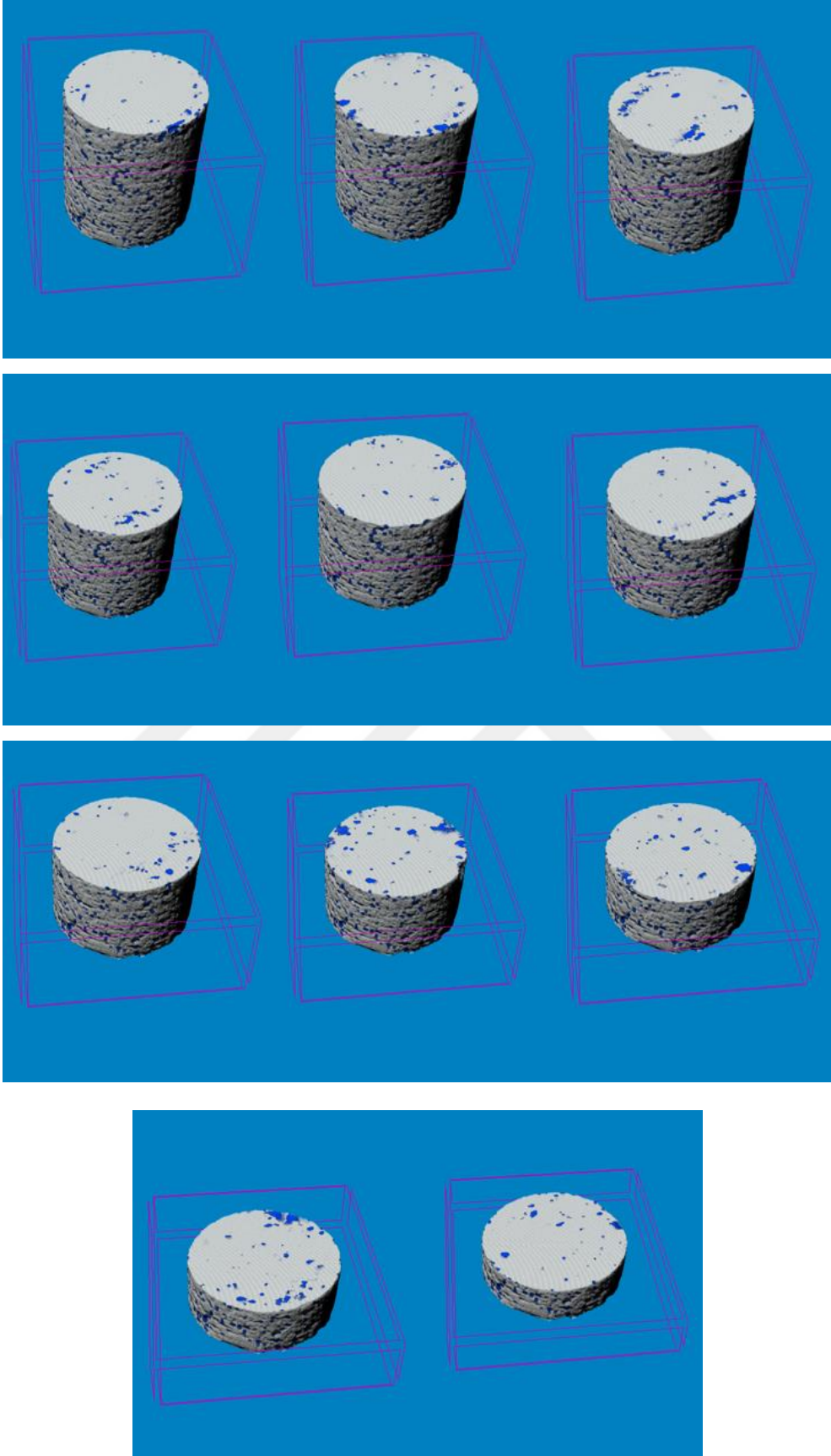
Şekil 5.19 P10-11 zemin 3D görüntüsü



Şekil 5.20 P10-11 zemin boy kesiti 3D görüntüleri



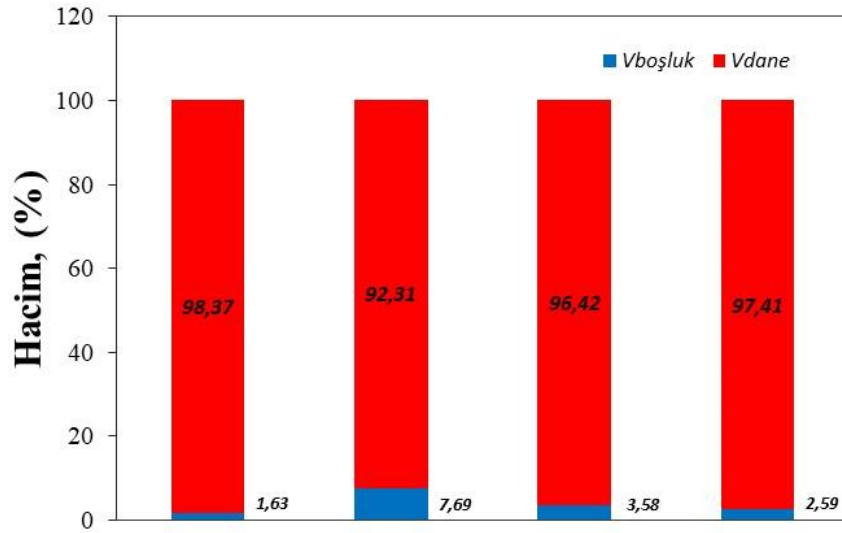
Şekil 5.21 P10-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri



Şekil 5.21 P10-11 zemin en kesiti 3D görüntüleri (devamı)

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan P10 zeminin boy ve en kesit görüntüleri, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de 11 donma çözülme çevrimine maruz kalan P0 zeminin boy ve en kesit görüntüleri sunulmuştur. Elde edilen görüntüler karşılaştırıldığında donma ve çözülme çevrimlerinin zeminin boşluk yapısını katkısız zemine göre çok az derecede etkilediği görülmektedir.

Bu görüntüler, donma çözülmenin, katkısız zeminin mikro-yapısını ciddi ölçüde etkileyerek hasar meydana getirdiğini; bu hasarın iyileştirilebilmesi için zemine ilave edilen mFDM katkı malzemesinin zemin davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Yapılan analizlerde, elde edilen görüntülerin yanı sıra, tüm numuneler için donma çözülme öncesi ve sonrası meydana gelen boşluk hacimleri ölçülmüş ve grafikleştirilmiştir. Katkısız ve katkılı zemin için yapılan boşluk hacim ölçümleri Şekil 5.22’de sunulmuştur.



Şekil 5.22 Dane ve boşluk hacimleri

Şekil 5.22’de sunulan grafikte mavi boşluk hacimlerini, kırmızı ise zemin-dane hacmini temsil etmektedir. P0-0 zeminin boşluk hacmi 1403 mm^3 , dane hacmi ise $84834,9 \text{ mm}^3$ ’tür. P0-11 zeminin boşluk hacmi $6615,5 \text{ mm}^3$, dane hacmi ise $79397,7 \text{ mm}^3$ ’tür. P10-0 zeminin boşluk hacmi 3118 mm^3 , dane hacmi ise 83863 mm^3 ’tür. P10-11 zeminin boşluk hacmi 2147 mm^3 , dane hacmi ise 80794 mm^3 ’tür. mm^3 cinsinden ifade edilen hacimler Şekil 5.22’de yüzde cinsinden verilerek gösterilmiştir.

Şekil 5.22’de de görüldüğü üzere P0-0 zeminin boşluk hacmi %1,63 iken, 11 donma çözülme çevrimleri sonunda boşluk hacmi %7,69 olmuştur. Boşluk hacmi donma

ve çözülme çevrimleri sonunda %6,06 artmıştır. Donma çözülmenin zeminin boşluk yapısını arttırdığı görüntüler ve ölçülen hacim değerleri ile ortaya konulmuştur.

Şekil 5.22’de de görüldüğü üzere P10-0 zeminin boşluk hacmi %3,58 iken, 11 donma çözülme çevrimleri sonunda boşluk hacmi %2,59 olmuştur. Boşluk hacmi donma ve çözülme çevrimleri sonunda katkısız zeminin aksine %0,99 azalmıştır. Donma çözülmenin zeminin boşluk yapısını iyileştirdiği görüntüler ve ölçülen hacim değerleri ile ortaya konulmuştur.

Bunun yanı sıra, donma ve çözülme çevrimlerine maruz kalıp kalmadığı önemli olmaksızın, katkı malzemesinin zemine ilavesi boşluk yapısını etkilemiştir. P0-0 zeminin boşluk hacmi %1,63 iken, katkı malzemesinin ilave edilmesi boşluk hacmini %3,58’e yükseltmiştir. Bu durum zeminin davranışında etkili olup mukavemetini etkilemiştir.

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan P0 zeminin boşluk hacmi %7,79 iken, katkı malzemesinin zemine ilave edilmesi ile bu oran %2,59’a azalmıştır. Bu durum, zeminin davranışında etkileyerek, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin iyileştirildiğini göstermektedir.

5.4 Sıcaklık Analizleri (Thermocouple Ölçümleri)

Bu tez çalışmasında uygulanan donma çözülme çevrimleri için sınır sıcaklık değerleri Şekil 2.13’te sunulmuştur. Uygulanan sıcaklık değerleri (-20 C° ve +20 C°) Şekil 2.12’de görseli sunulan donma çözülme kabini içerisinde manual/otomatik olarak ölçülüyor olsa da, kabin içerisindeki numunelerin de hedeflenen sıcaklık değerlerine ulaşp ulaşmadığının yapılacak sıcaklık ölçümleri ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, her bir katkı oranı (%0, %5, %8, %10) için Şekil 5.23’te görseli, Tablo 5.3’te çalışma ve ölçüm sıcaklık değerleri sunulan thermocouple cihazı kullanılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



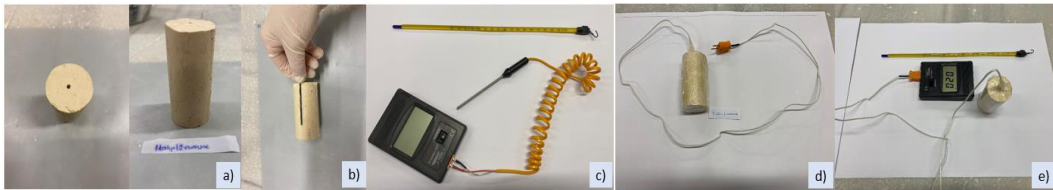
Şekil 5.23 Thermocouple cihazı

Tablo 5.3 Thermocouple çalışma ve ölçüm sıcaklık değerleri

Ölçüm aralığı:	-50 C° ile 750 C°, -50 C° ile 1300 C°
Çalışma sıcaklığı:	0 C° ile 50 C°

Sıcaklık ölçümleri için, Tablo 2.3'te belirtilen 2. prosedür baz alınmış, her bir karışım (P0, P5, P8, P10) Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te belirlenen optimum su muhtevası değerinde ve standart kompaksiyon enerjisinde Şekil 2.9'daki gibi sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan Şekil 2.11'deki gibi 3,5 cm x 7 cm ebatlarında numuneler alınmıştır.

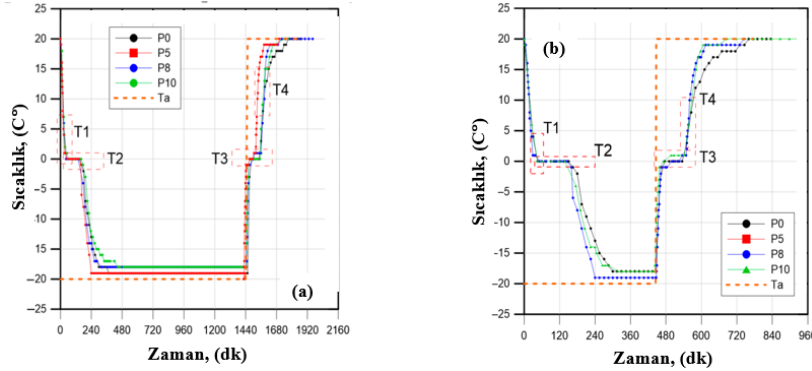
Tüm katkı oranları (P0, P5, P8, P10) üzerinde gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinde izlenen adımlar Şekil 5.24'te sunulmuştur.



Şekil 5.24 Thermocouple aparatları

Şekil 2.9'daki gibi alınan katkılı (P5, P8, P10) ve katkısız (P0) deney numuneleri üzerinde, sıcaklık ölçümü yapılabilmesi için Şekil 5.24a'daki deney numunesi içinde boşluk açılmıştır. Bunun için, Şekil 5.24b'deki gibi, thermocouple'ın ölçme çubuğunun girebileceği genişlikte bir alyan kullanılmıştır. Şekil 5.24c'deki ölçüm cihazı ve ölçüm çubuğu Şekil 5.24d'de olduğu gibi serbest basınç deney numunesi

içerisine yerleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı Şekil 5.24e’de olduğu gibi hem manual olarak civalı termometre ile hem de thermocouple ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Katkılı ve katkısız zemin üzerinde gerçekleştirilen thermocouple ölçüm sonuçları Şekil 5.25’te sunulmuştur.



Şekil 5.25 Sıcaklık ölçüm sonuçları

Şekil 5.25’te, ortam sıcaklığı Ta ile gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı, 24 saat boyunca -20 C° , 24 saat boyunca $+20\text{ C}^{\circ}$ ’de sabit tutulmaktadır. Şekil 5.25a, donma çözülme çevrimlerine (24 saat boyunca -20 C° ’de ve 24 saat boyunca $+20\text{ C}^{\circ}$ ’de) maruz kalan numunelerde elde edilen verileri göstermektedir. Şekil 5.25b ise, numunelerin -20 C° değerini görmesinin hemen ardından ortam sıcaklığının $+20\text{ C}^{\circ}$ ’ye geçilmesi durumunda elde edilen verileri göstermektedir. Her iki durumda da aynı değerler elde edilmiştir. Test sırasında, ortam sıcaklığı düştükçe ve arttıkça, mFDM içeren numunelerin sıcaklık eğrileri dört evrede gelişmiştir. Bu evreler T1 (katılaşmaya-donmaya geçiş periyodu), T2 (donma periyodu), T3 (erimeye geçiş periyodu) ve T4 (erime periyodu) olarak gösterilmiştir (Rao vd., 2021).

Katkısız zemin (P0) T1 periyodunu 45 dk’da, P5, P8, P10 zemin ise bu periyodu sırasıyla 52, 45 ve 60 dakikada tamamlamıştır. Yani, P0, P5, P8 ve P10 zemin sırasıyla test başlangıcından 45, 52, 45 ve 60 dakika sonra donmaya başlamıştır (0 C° ’ye ulaşmıştır). 0 C° , T2 periyodu donma başlangıcıdır. T1 sürelerinin P0, P5 ve P8 zemin için yakın olduğu görülmektedir. Ancak P10 zemin için T1 süresinde gözle görülebilir bir artış meydana gelmiştir.

mFDM oranının artması ile T2 sırasında geçen süre azalmıştır. P0 zemin ile P5, P8 ve P10 zeminin T2 periyodunda geçen süreleri sırasıyla 105, 93, 95 ve 100 dakikadır. mFDM eklenmesi zeminin donma noktasını değişen derecelerde ($\%9,5$,

%9,5, %5) azaltmıştır. P0 zemin deney başından itibaren T2 süresinin sonuna 150 dakikada, P5, P8 ve P10 zemin ise sırasıyla 145, 138 ve 160 dakika'da ulaşmıştır. Tüm numuneler için T1 ve T2 periyodlarının tamamlanması süreleri birbirine yakındır. Ancak, periyotlarda (T1 ve T2) geçen sürelerin mFDM çalışma mekanizmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

T3, çözülme periyoduna geçişteki 0 C°'de bekleme süresini ifade etmektedir. mFDM oranının artması ile T3 sırasında geçen sürede azalma görülmüştür. P0 zemin ile P5, P8 ve P10 zeminlerin T3 periyodu süreleri sırasıyla 60, 25, 15 ve 12 dakikadır. Numunelerin 0 C°'de bekleme süresi (çözölmeye geçiş periyodu) oldukça kısa sürmüştür.

P0 zemin, 0 C°'den +20 C°'ye (T3-T4 arası) 225 dk'da ulaşırken, P5, P8, P10 zemin bu kısmı sırasıyla 215, 205 ve 140 dakikada tamamlamıştır. mFDM oranının artması ile T4 sırasında geçen sürede azalma görülmüştür. T3 ve T4 periyotlarında geçen süreler P10 zemin için oldukça kısadır. Ortam sıcaklığı arttıkça, katkılı zeminin katkısız zemine göre, özellikle T3 ve T4 periyotlarında çok daha kısa sürelerde değişim meydana geldiği görülmüştür.

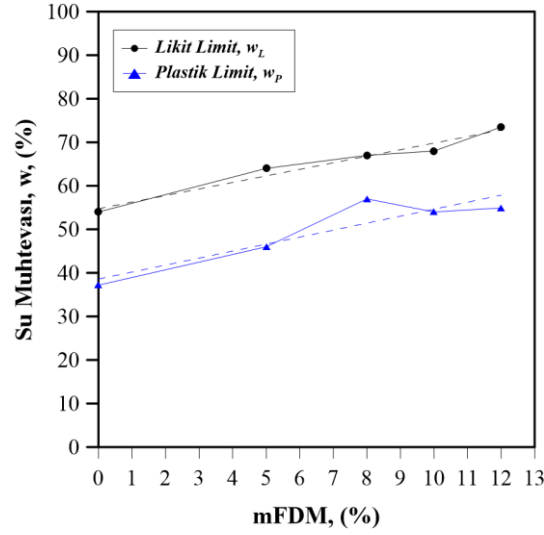
Katkısız zeminin +20 C°'den -20 C°'ye düşmesi için gereken süre 375 dk. olarak ölçölmüştür. P5, P8 ve P10 zeminde ise bu süreler sırasıyla, 300, 330 ve 445 dakikadır. Sıcaklığın +20 C°'den -20 C°'ye düşmesi için gereken süre genellikle numunenin artan mFDM oranı ile artmıştır. Bu durum FDM'nin uygun termal etkileri için daha fazla kanıt sağlamaktadır.

Zemine mFDM eklenmesi, zemin karışımının sıcaklık davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Örneğin, deneyin 25. dakikasında P0 zeminin sıcaklığı 9 C° iken, P5, P8 ve P10 zeminin sıcaklıkları sırasıyla 4 C°, 6 C°, 7 C° olmuştur. 5, 8 ve %10 mFDM ilavesi zeminin sıcaklıklarını değiştirmiştir. Faz değişimi sırasında mFDM'den ısı üretimi zeminde bir çözölme etkisine neden olduğundan, mFDM zeminin donma sürecinde bir yavaşlamaya yol açmıştır. Ayrıca, katkı içeriğinin artması zemin sıcaklıklarının daha fazla düşmesine neden olmuştur.

DENEYSEL SONUÇLAR

Yüksek plastisiteli killi silt bir zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması durumunda göstereceği mühendislik davranışı üzerinde mFDM etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında, %5, %8, %10 ve %12 katkı oranında hazırlanan ve 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 donma çözülme çevrimine maruz bırakılan numuneler üzerinde Atterberg limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç, tek boyutlu ödometre ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Başvurulan deneysel yöntem, katkı oranları ve donma çözülme çevrim sayıları için Tablo 1.8’de özetlenen FDM ve mFDM katkılı zemin karışımları üzerinde yapılan literatür çalışmaları etkin rol oynamıştır.

%5, %8, %10 ve %12 oranlarında zemine ilave edilen mFDM’nin, Atterberg limitleri ve kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk) üzerindeki etkileri 2. Bölümde belirlenmiştir. Yapılan bu deneyler ile donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmayan mFDM katkılı zemin karışımlarının davranışı incelenmiştir. Tüm katkı oranları için, Atterberg limitleri (likit, plastik ve lineer rötre) ile elde edilen veriler Tablo 2.13’te, likit limit vuruş sayısı-su muhtevası ilişkisi Şekil 2.30’da, likit limit-plastisite indeksi ilişkisine göre zeminin Casagrande kartındaki yeri Şekil 2.31’de sunulmuştur. Tablo 1.8’de de sunulduğu üzere mFDM’nin zeminin Atterberg limitleri üzerine olan etkisi Mahedi vd. (2019) ve Liu vd. (2021) tarafından incelenmiş, elde edilen bulgular Atterberg limit-mFDM ilişkisi olacak şekilde Şekil 1.8 ve Şekil 1.35’te sunulmuştur. Benzer şekilde, bu tez çalışmasında bulunan ve Tablo 2.13’te sunulan değerler kullanılarak Atterberg limit-mFDM ilişkisi de Şekil 6.1’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.1 Atterberg limiti-mFDM ilişkisi

Şekil 6.1'deki mFDM katkı oranı ve likit limit arasındaki ilişkiye göre, mFDM oranının artması likit limiti artırmıştır. Ancak %8 ve %10 mFDM katkı oranı likit limiti çok değiştirmemiştir. %12'lik mFDM katkısında ise likit limit değeri yaklaşık %19 oranında artmıştır. Bunun nedeninin ise mikrokapsüllerin patlamış olabileceğidir. Şekil 6.1'de, %5 mFDM katkısında plastisite indeksi fazla değişmemiştir, ancak %8, %10 ve %12 mFDM katkılarında, plastisite indeksi sırasıyla %8 azalıp, %4 ve %5 artmıştır. Farklı oranlarda (%5, 8, 10, 12) zemine ilave edilen mFDM katkı maddesi zemin sınıfını değiştirmemiştir. Tüm mFDM katkı oranları için zemin sınıfı MH olarak kalmıştır.

Mahedi vd. (2019)'un elde ettiği Şekil 1.8'deki ilişkide ise mFDM oranının artması likit limit değerini %8 mFDM katkı oranına kadar arttırıp, %10 mFDM katkı oranında azaltırken, plasitisite indeksi değerini %8 oranına kadar değiştirmemiş, %10 katkı oranında azalmasına yol açmıştır. Liu vd. (2021)'in elde ettiği ve Şekil 1.35'teki ilişkide ise mFDM ilave edilmesi zeminin başlangıç likit limit değerini %5 azaltırken, mFDM oranının artması likit limit değeri ve plastisite indeksi değerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan likit limit deney sonuçları Mahedi vd. (2019)'un sonuçları ile örtüşürken, Liu vd. (2021)'in sonuçları ile örtüşmemektedir. Bunda zemin sınıfının ve ince dane oranının etkisi olduğu düşünülmektedir. Liu vd. (2021) çalışmalarında, %45,30 silt, %34,30 kil, %20,40 kum içeren zemin tercih ederken, Mahedi vd. (2019)'un kullanmış olduğu zemin %71 silt, %11 kil içeriğine

sahiptir. Bu çalışmada da tercih edilen zeminde yapılan elek ve hidrometre analizi sonunda zemin içerisinde %55,5 silt, %45,5 kil saptanmıştır (Tablo 2.1 ve Şekil 2.3). Zemin dane içeriği olarak, bu tez çalışmasında tercih edilen MH zeminin ince dane oranı Mahedi vd. (2019)'un zemin içeriğine daha yakındır. Ayrıca, Liu vd. (2021)'in zemininde yer alan kum oranının sonuçlar üzerinde etkisinin büyük olduğu düşünülmektedir. Tüm bunlara ilave olarak kullanılan mFDM'nin, kapsül yapısının vb. diğer tüm etkenler sonuçlar üzerinde büyük öneme sahiptir. Lecompte vd. (2015), mFDM oranının artması ile likit limitte meydana gelen artışın, mFDM'lerin yüksek su emme kapasitesinden kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Standart kompaksiyon enerjisinde yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen veriler, tüm katkı oranları için Tablo 2.14'te, kompaksiyon eğrileri ise Şekil 2.33'te sunulmuştur. Tablo 1.8'de de sunulduğu üzere mFDM'nin zeminin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisi Mahedi vd. (2019), Liu vd. (2021) ve Luo vd. (2023) tarafından incelenmiş, elde edilen bulgular sırasıyla Tablo 1.5, Şekil 1.7, Şekil 1.34 ve Tablo 1.7'de sunulmuştur.

Tablo 1.5 ve Şekil 1.7'deki sonuçlar doğrultusunda Mahedi vd. (2019)'un kullanmış oldukları zeminin optimum su muhtevası %16,5 olup, her bir mFDM katkı oranı (%5, %8, %10) için bu parametre sırasıyla %18,2, %17,0, %16,2 değerlerini almıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise $16,7 \text{ kN/m}^3$ olup, bu parametre de her bir katkı oranı için sırasıyla $15,4 \text{ kN/m}^3$, $14,8 \text{ kN/m}^3$, $14,5 \text{ kN/m}^3$ değerini almıştır. Mahedi vd. (2019)'un elde ettiği veriler sonucunda optimum su muhtevası değeri artan mFDM oranı ile önce artmış, %8 mFDM oranından sonra azalmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ise artan mFDM oranlarının tümü için azalmıştır.

Şekil 1.34'teki sonuçları doğrultusunda Liu vd. (2021)'in kullanmış oldukları zeminin optimum su muhtevası (%15,68) olup, her bir mFDM oranı için (%5, %8, %10) için bu parametre sırasıyla %13,44, %12,93 ve %12,30 değerlerini almıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri ise $1,78 \text{ gr/cm}^3$ olup, bu parametre de her bir katkı oranı için sırasıyla $1,69 \text{ gr/cm}^3$, $1,68 \text{ gr/cm}^3$, $1,64 \text{ gr/cm}^3$ değerini almıştır. Liu vd. (2021)'ün elde ettiği veriler sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerleri artan mFDM oranı ile azalmıştır.

Tablo 1.7'deki sonuçları doğrultusunda Luo vd. (2023)'ün kullanmış oldukları zeminin optimum su muhtevası %15,18 olup, her bir mFDM oranı için (%5, %8, %10) için bu parametre sırasıyla %16,45, %19,06 ve %21,05 değerlerini almıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri ise 1,803 gr/cm³ olup, bu parametre de her bir katkı oranı için sırasıyla 1,64 gr/cm³, 1,57 gr/cm³, 1,53 gr/cm³ değerini almıştır. Luo vd. (2023)'ün elde ettiği veriler sonucunda artan mFDM oranı ile optimum su muhtevası artmış, maksimum kuru yoğunluk değeri ise azalmıştır.

Üç araştırmacının yapmış olduğu kompaksiyon deneylerinde elde ettikleri optimum su muhtevası değeri farklı eğilim gösterirken, maksimum kuru yoğunluk değerinde azalma meydana gelmiştir.

Tablo 2.14'te sunulan deney sonuçları dikkate alındığında ise, zemine göre daha hafif özgül ağırlıkta olan mFDM'nin, zemine ilave edildiği oranın artması ile zeminin optimum su muhtevası %31'den %46'ya yükselmiş, maksimum kuru yoğunluğunda ise 1,36 gr/cm³'ten 1,08 gr/cm³'e azalma meydana gelmiştir.

Figueiredo vd. (2016), PCM ilavesine bağlı olarak beton yoğunluğunda bir azalma olduğunu belirtmiş, Lecompte vd. (2015) ise klasik agregalarla karşılaştırıldığında, PCM'nin daha yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu ile ilişkilendirmiştir.

mFDM için optimum su muhtevasındaki ilk artış, boşluk oranının artmasından kaynaklı olmuştur. Ancak, ilk artışın ardından optimum su muhtevası, artan mFDM oranıyla önce sabit kalmış, ardından önemli bir artış göstermiştir. Bunun sebebinin zemin ve mFDM karışımlarının boşluk oranının, kompaksiyon sırasında mikrokapsüllerin patlaması nedeniyle artmış olabileceğidir (Lecompte vd., 2015). Artan mFDM oranı ile elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim arasındaki ilişki Mahedi vd. (2019) ve Luo vd. (2023)'ün bulduğu sonuçları da desteklemektedir.

Şekil 2.33'te katkısız zeminde, optimumun ıslak tarafındaki kompaksiyon noktalarının %95 suya doygunluk eğrisinin yaklaşık üzerinde olduğu görülmektedir. Su muhtevası arttıkça zeminin kuru birim hacim ağırlığı azalmış ve %95 suya doygunluk eğrisi üzerinde yer almıştır. 5 ve %8 mFDM katkılı zeminlerin optimum su muhtevası değerleri yaklaşık aynıdır, ancak optimumun kuru tarafındaki su muhtevası yoğunluk ilişkileri oldukça farklıdır. %5 mFDM katkılı karışım geniş bir su muhtevası-yoğunluk ilişkisi göstererek katkısız zemin

davranışına benzemektedir. Ancak optimumun ıslak tarafında 5-8% mFDM katkılı karışımların davranışı oldukça benzerdir. Bunun nedeninin, mFDM'in yüksek su emme kapasitesi ile su muhtevastaki hızlı artışa bağlı olarak boşluklardaki su miktarının artması ve kompaksiyonda boşluklardaki su basıncının artarak zemin danelerinin birbirine yaklaşmaması sonucu olduğu düşünülmektedir.

%10 ve %12 mFDM katkılı zeminin kompaksiyon değerleri diğer kompaksiyon eğrilerinden oldukça farklıdır. 10 ve %12 mFDM katkısı ile optimum su muhtevastında artış görülürken, kuru yoğunluk değerinde ciddi oranda azalma meydana gelmiştir. Her iki katkı oranı için optimum su muhtevastının ıslak tarafındaki kompaksiyon noktaları %90 suya doygunluk eğrisine oldukça uzaktır. Optimumun kuru tarafında 8-10% mFDM katkılı karışımların eğri davranışları birbirine benzerken, optimum ıslak tarafında 8-12% mFDM katkılı karışımların eğri davranışı birbirine benzemektedir.

mFDM'nin donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan zemin üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiş ve elde edilen veriler literatür ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan mFDM'nin zeminin sınıfını ve don hassasiyetini değiştirmedığı sonucuna varılmıştır. mFDM'nin bunu sağlamasının yanı sıra, donma çözülme çevrimlerinin uygulanacağı sınır sıcaklık değerleri arasında da faz değiştirme özelliği göstermesi gerekmektedir. Bu amaçla likit ve mikrokapsüllü FDM üzerinde gerçekleştirilen DSC analiz verileri Şekil 2.26, Şekil 2.27 ve Tablo 2.11'de, P10 zemin üzerinde gerçekleştirilen DSC analiz verileri Şekil 5.2 ve Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 1.8'de de sunulduğu üzere FDM ve mFDM'nin termal özellikleri tüm araştırmacılar tarafından incelenmiş olup elde edilen veriler Şekil 1.6, Şekil 1.12, Şekil 1.16, Şekil 1.25, Şekil 1.33, Şekil 1.38, Şekil 1.43 ve Şekil 1.50'de grafikler halinde, Tablo 1.10'da ise toplu halde sunulmuştur.

Mahedi vd. (2019), çalışmasında kullanmış olduğu her iki formdaki (kapsüllü ve kapsülsüz) FDM için, çekirdek malzemesinin aynı olması sebebi ile sadece likit FDM üzerinde DSC analizi yapılmasının yeterli olduğunu belirtmiştir (Şekil 1.6). Bu çalışmada ise, hem oda sıcaklığında likit halde bulunan FDM hem de mikrokapsüllenmiş FDM üzerinde DSC analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.26 ve Şekil 2.27). Her iki formdaki FDM'nin erime ve katılaşma sürecindeki faz

değiştirme sıcaklık aralıkları ($^{\circ}\text{C}$), tepe sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{C}$), erime ısısı (mJ) ve entalpi (J/g) değerleri birbirinden farklılık göstermiştir. Bu durum, Mahedi vd. (2019)'un önerisini desteklememektedir.

DSC analizlerinde, tarama hızı genel olarak $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olmaktadır. Ancak bu değer, yöntemin sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğinden FDM'ler için daha gerçekçi ve uniform sonuçlar vereceğinden genellikle $\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olan düşük ısıtma ve soğutma hızlarının uygulanması önerilmektedir (Erdemir ve Hekimoğlu, 2022; Wang vd., 2019). Kravchenko vd. (2020) ve Kravchenko vd. (2021) ile Rao vd. (2021) bu doğrultuda, yapmış oldukları çalışmada kullandıkları FDM'ler üzerinde iki ayrı tarama hızı uygulayarak DSC analizlerini gerçekleştirmiş ve sonuçları Tablo 1.10'da sunmuştur (Şekil 1.12 ve Şekil 1.16). Kravchenko vd. (2020) ve Kravchenko vd. (2021) ile Rao vd. (2021) sonuçlarına göre, $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ tarama hızındaki DSC analiz sonucunun, $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ tarama hızındaki DSC analiz sonucuna göre daha hassas olduğu görülmüştür. Tablo 1.9'da sunulan DSC analiz koşulları incelendiğinde araştırmacıların tarama hızı için $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$, $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ve $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ tercih ettikleri görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise DSC analizleri düşük tarama hızı olan $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ 'da gerçekleştirilmiştir.

mFDM katkılı zemin üzerinde DSC analizleri gerçekleştiren Chen vd. (2021) ve Chen vd. (2023), hem ısıtma hem de soğutma eğrilerinde iki farklı faz değiştirme sıcaklığı aralığı elde etmişlerdir (Şekil 1.25, Şekil 1.43). Bu tez çalışması kapsamında da %10 mFDM katkılı zemin üzerinde DSC analizleri gerçekleştirilmiş, ısıtma eğrisinde farklı faz değiştirme sıcaklık aralıkları elde edilmiştir (Şekil 5.2 ve Tablo 5.1). Katkılı zeminin iki farklı faz değiştirme sıcaklık aralığı olması, Chen vd. (2021) ve Chen vd. (2023)'ü desteklemektedir.

Tablo 1.9 ve Tablo 1.10'da sunulan veriler incelendiğinde, kullanılan tüm mFDM'lerin donma çözülme çevrim sınır sıcaklık değerleri arasında faz değiştirme özelliği gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, Tablo 1.10'da kullanılan mFDM'lerin faz değiştirme sıcaklık aralıklarının geniş bir ölçekte olduğu, bu tez çalışmasında kullanılan mFDM'nin de faz değiştirme sıcaklık aralığının oldukça geniş bir aralıkta kaldığı yapılan DSC analizlerinde elde edilmiştir (Şekil 2.26, Şekil 2.27, Şekil 5.2, Tablo 2.11 ve Tablo 5.1). Bu durum, deney sonuçlarından da görülebilmektedir. Yapılan mukavemet ve tek boyutlu ödometre deney

sonuçlarının tatmin edici olması mFDM'nin faz değiştirme sıcaklıklarının geniş bir aralıkta olmasından kaynaklıdır.

%5, %8, %10 ve %12 oranlarında zemine ilave edilen mFDM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının mukavemet davranışı üzerindeki etkileri 3. Bölümde belirlenmiştir. Yapılan serbest basınç deneyleri ile mFDM katkılı zemin karışımlarının davranışı donma çözülme çevrimleri altında incelenmiştir. Yapılan serbest basınç deneylerinden edilen gerilme (σ)-şekil değiştirme (ϵ) ilişkileri her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.1-Şekil 3.5'te, her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.6-Şekil 3.9'da, hesap edilen serbest basınç mukavemeti ve şekil değiştirme değerleri Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 1.8'de de sunulduğu üzere mFDM'nin zeminin serbest basınç mukavemeti üzerine olan etkisi Mahedi vd. (2019), Rao vd. (2021), Chen vd. (2021), Chen vd. (2022), Chen vd. (2023), Luo vd. (2023) ve Guo vd. (2024) tarafından incelenmiş, elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri DÇ çevrim sayısına bağlı olacak şekilde Şekil 1.19 ve Şekil 1.56'da, mFDM oranına bağlı olacak şekilde Şekil 1.26, Şekil 1.40, Şekil 1.45, Şekil 1.53'te sunulmuştur.

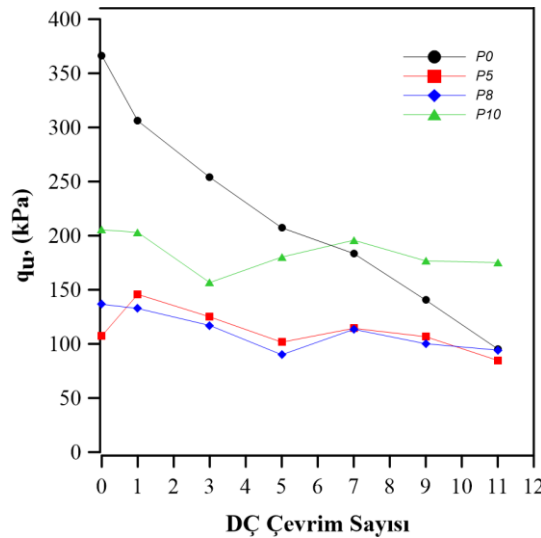
Şekil 3.1-3.5'te sunulan gerilme (σ)-şekil değiştirme (ϵ) eğrileri her bir mFDM oranı (P0, P5, P8, P10, P12) için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve artan donma çözülme çevrimlerinin zeminin serbest basınç mukavemetinde kayıp meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu davranış Chen vd. (2021), Chen vd. (2022), Chen vd. (2023) ve Luo vd. (2023)'ün elde ettiği bulguları destekleyici olmuştur. Zemin sınıfı ve zeminin mFDM katkılı olup olmadığı fark etmeksizin, donma çözülme çevrimleri zeminin serbest basınç mukavemetinde kayıp meydana getirmiştir.

Şekil 3.6a'da donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan numunelerin serbest basınç eğrileri gösterilmiştir. mFDM ilavesi ile q_u 'nun azaldığı görülmektedir. mFDM'nin daha hafif özgül ağırlığı nedeniyle, artan katkı oranıyla kilin hem maksimum kuru yoğunluğu hem de mukavemeti azalmıştır. Lecompte vd. (2015), ayrıca mFDM'nin varlığının mekanik mukavemetini de büyük ölçüde azalttığını belirtmiş ve mFDM'nin mukavemeti azaltmak için boşluklar gibi davrandığı sonucuna varmıştır.

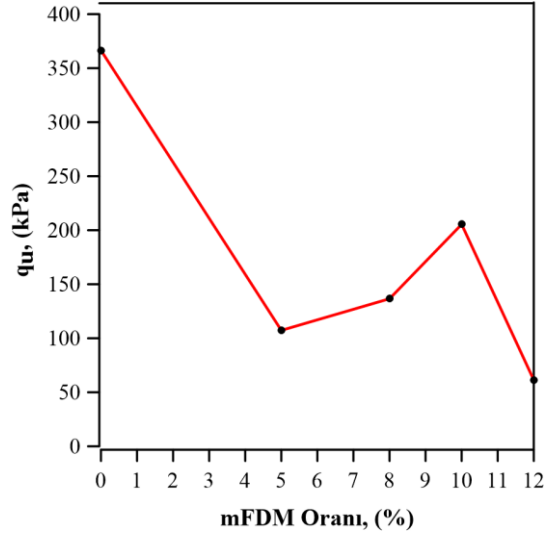
Şekil 3.6a'daki eğrilerde serbest basınç mukavemetinin pik değerleri 13-20% şekil değiştirme aralığında meydana gelmiştir. P5, P8 zeminde mukavemet azalırken, P10 zeminde serbest basınç mukavemeti artma eğilimine geçmiştir. P12 zeminde ise serbest basınç mukavemeti diğer katkı oranlarına (%5, %8, %10) göre oldukça düşük bir değer göstermiştir.

Şekil 3.6b-3.9'da farklı donma çözülme çevrimlerine maruz kalan katkılı ve katkısız numunelerin serbest basınç mukavemetindeki değişimler gösterilmiştir. %12 mFDM katkısının zeminin mukavemetini önemli ölçüde (yaklaşık olarak %84) azalttığı görülmüştür. mFDM'in donma çözülme çevrimleri boyunca zeminin mukavemetini sabit tutma özelliği göz önünde bulundurularak, %12 katkı oranı için deneyler çevrimsiz (0) ve 1 çevrim altında yapılmıştır. Geri kalan çevrimler, katkı oranının neden olduğu düşük mukavemet sebebiyle yapılmamıştır (Şekil 3.5). Artan donma çözülme çevrimlerinin özellikle katkısız zeminin serbest basınç mukavemetini önemli miktarda düşürdüğü görülmektedir. mFDM katkısının artan donma çözülme çevrimleri boyunca zeminin mukavemetini stabil tuttuğu belirlenmiştir. Ayrıca, mFDM ilave edilmiş zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin eğiliminin farklı katkı oranlarına göre değiştiği görülmüştür.

Şekil 3.10-Şekil 3.13'te her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde incelenen q_u (kPa) ile DÇ çevrim sayısı ilişkisi toplu bir biçimde Şekil 6.2'de sunulmuştur. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan katkılı (P5, P8, P10, P12) ve katkısız (P0) zemin üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri ile elde edilen q_u (kPa) ile mFDM (%) oranı ilişkisi ise Şekil 6.3'te sunulmuştur.



Şekil 6.2 q_u (kPa)-DÇ çevrim ilişkisi



Şekil 6.3 q_u (kPa)-mFDM (%) ilişkisi

Şekil 6.2’de, mFDM ilave edilmiş zeminlerde belirlenen serbest basınç mukavemeti (q_u) ile uygulanan donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 3.6a ve Şekil 6.2’de, katkısız zeminin donma çözülme çevrimleri sonucunda mukavemetinde önemli miktarda azalma olduğu görülmektedir. Donma çözülme çevrimlerinin bu olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması için zemine katılan mFDM katkısının zeminin davranışını etkilediği açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 6.2 ve Şekil 3.6a birlikte değerlendirildiğinde P5-0, P8-0, P10-0, P12-0 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri P0-0 numunesine göre sırasıyla %71, %63, %44 ve %84 azalarak, 366 kPa’dan sırasıyla 107 kPa, 136 kPa, 206 kPa, 61 kPa’a düşmüştür. Katkısız zeminde (P0) serbest basınç mukavemeti (q_u) 366 kPa’dır. 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma çözülme çevrimlerinden sonra mukavemet sırasıyla %16, %31, %43, %50, %62, %74 azalarak önemli kayıplar meydana gelmiştir.

P5 ve P8 zeminin mukavemet davranışı birbirine oldukça yakındır. P5-11 ve P8-11 numunelerinin mukavemet değerleri P0-11 numunesinin mukavemet değeri ile aynıdır. P0-11, bu değeri 11 çevrim sonunda %74 kayıp ile görürken, P5-11 ve P8-11 numuneleri tüm çevrimlerde hemen hemen sabit bir değerde kalmaktadır. Bu da mFDM katkılı zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden mukavemet değerinin sabit tutulabildiğini göstermektedir. Böylece, mFDM’in zemin içine

katılmasının donma çözülme çevrimlerinde mukavemetin etkilenmeden kalabildiğini göstermektedir.

Ayrıca, mFDM oranının %10 olması durumunda mukavemetin diğer oranlara kıyasla arttığı, donma çözülme çevrimlerinde daha iyi bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. P10-11 numunesinin maksimum %14 mukavemet kaybı ile performansını diğer katkı oranlarına göre daha çok koruduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, mFDM katkısının ısı verme-alma özelliği ile donma çözülme çevrimleri sırasında zeminin mukavemetinde meydana gelen olumsuz değişimleri etkili bir biçimde azalttığı tespit edilmiştir.

%12 mFDM karışımı deney numunelerinde yapılan serbest basınç deneylerinde, katkısız (0% mFDM) zemine göre %84 daha az mukavemet elde edilmiştir. Şekil 3.6a ve 3.6b’de sunulan grafiklerde mukavemet kaybı açıkça görülmektedir. Yapılan serbest basınç deneylerinden belirlenen q_u değeri için donma çözülme çevrimleri boyunca en iyi katkı oranının %10 olduğu belirlenmiştir.

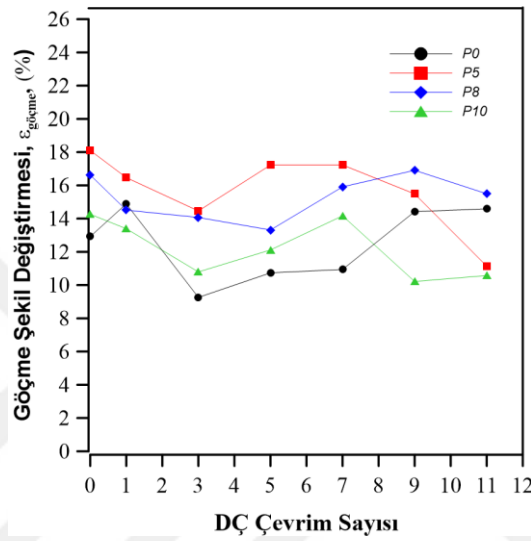
Şekil 6.2’de sunulan ilişki ise Rao vd. (2021) tarafından Şekil 1.20, Chen vd. (2021) tarafından Şekil 1.27, Luo vd. (2023) tarafından Şekil 1.52a ve Şekil 1.52b’de, Guo vd. (2024) tarafından Şekil 1.57’de sunulmuştur. Şekil 6.3’te sunulan ilişki benzer şekilde Mahedi vd. (2019) tarafından Şekil 1.9, Chen vd. (2022) tarafından Şekil 1.39, Chen vd. (2023) tarafından Şekil 1.44, Luo vd. (2023) tarafından Şekil 1.52c ve Şekil 1.52d’de sunulmuştur. Bahsi geçen tüm çalışmalarda, benzer eğilim görülmüştür.

Rao vd. (2021), mFDM’li zeminin mukavemetinin azalmasındaki en önemli nedenin mFDM’nin düşük ağırlıkta olmasından, Lecompte vd. (2015) ise mFDM’nin boşluklar gibi davranmasından kaynaklı olduğunu belirtmiştir.

Sonuç olarak, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te sunulduğu üzere, artan donma çözülme çevrimleri katkısız zeminin serbest basınç mukavemetinde önemli miktarda azalmaya neden olmuştur. mFDM ilave edilmesi, zeminin başlangıç mukavemet değerini azaltsa da, donma çözülme çevrimlerinde mukavemetini korumuştur. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te sunulan veriler birlikte değerlendirildiğinde, artan mFDM oranı mukavemette artış sağlamış ve özellikle mFDM oranının %10 olması halinde zeminin mukavemetinin diğer katkı oranlarına kıyasla iyileştiği, donma çözülme

çevrimleri boyunca mukavemeti sabit tuttuğu, diğer katkı oranlarına göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Zeminin gerilme şekil değiştirme davranışında önemli bir parametre olan, serbest basınç deneylerinde maksimum gerilme değerine karşılık gelen göçme şekil değiştirme ($\epsilon_{göçme}$) değeri ile DÇ çevrim sayısı ilişkisi her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.14-Şekil 3.17’de, toplu bir biçimde Şekil 6.4’te sunulmuştur.



Şekil 6.4 $\epsilon_{(göçme)}$ -DÇ çevrim ilişkisi

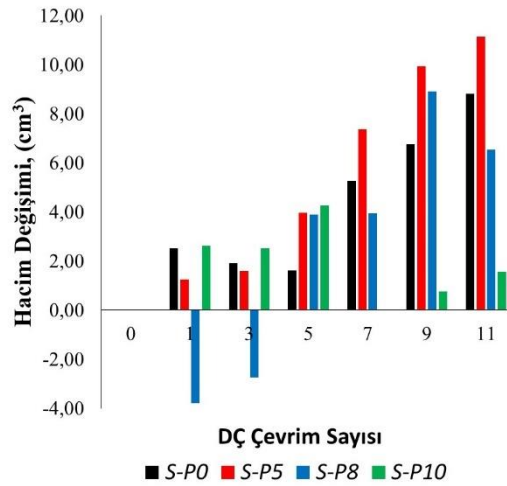
Gerilme şekil değiştirme eğrilerinin hepsinde elastik davranıştan sonra pik mukavemete ulaşılarak strain softening davranışı görülmüştür. Donma çözülme çevrim sayısı arttıkça, elastik kısımdaki gerilme artış hızı azalmıştır. Numuneler donma çözülme çevrimlerinden kaynaklı olarak hasarlanmış ve sonuç olarak plastik şekil değiştirme oranı artış göstermiştir.

Benzer ilişkiler Chen vd. (2021), Chen vd. (2022) ve Chen vd. (2023) tarafından da incelenmiş olup ilgili ilişkiler Şekil 1.28, Şekil 1.41 ve Şekil 1.46’da sunulmuştur. Chen vd. (2021), ilk donma çözülme çevriminin katkısız zemin numunesinin şekil değiştirme davranışı üzerinde çok etkisi olduğunu, diğer çevrimlerde şekil değiştirmenin çok farklılaşmadığını belirtmiştir. mFDM katkılı zeminde göçme şekil değiştirmesinin donma çözülme çevrimlerinden etkilenmediği ve hemen hemen sabit kaldığını belirtmiştir. Chen vd. (2021)’in aksine, Şekil 6.4’te donma çözülme çevrimlerinin katkılı ve katkısız zeminlerin göçme şekil değiştirme davranışı üzerinde önemli değişimlere neden olduğu görülmektedir. Katkısız ve

katkılı zeminlerde donma çözülme çevrimlerinde elde edilen göçme şekil değiştirme değerleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Şekil 6.4’te görüldüğü üzere tüm zemin karışımlarında, 1. ve 3. donma çözülme çevrimi göçme şekil değiştirmesinde azalmaya, 5. ve 7. donma çözülme çevrimleri ise artışa neden olmuştur. 9. ve 11. çevrimler şekil değiştirmeleri farklı etkilemiştir. Genel olarak artan mFDM oranı göçme şekil değiştirmesini azaltmıştır.

Serbest basınç deneylerinde elde edilen q_u değerleri üzerinde donma çözülme çevrim sayısının etkili olduğu sunulan şekiller ve tablolarda açıkça görülmektedir. Uygulanan donma çözülme çevrimlerinin zeminin hacmi üzerinde meydana getirdiği değişimlerin de zeminin q_u değeri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda, her bir katkı oranı için yapılan deneylerde hesap edilen hacim değişimi (ΔV) değerleri donma çözülme çevrimlerine bağlı olarak ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 3.29-Şekil 3.32’de ve Tablo 3.3’te, toplu bir biçimde Şekil 6.5’te sunulmuştur.



Şekil 6.5 ΔV -DÇ çevrim ilişkisi

Donma çözülme çevrim sayısının artması katkısız (P0) ve katkılı (P5, P8, P10) zeminlerin hacimlerinde değişime neden olmuştur. Şekil 1.31 dikkate alınarak hesaplanan hacim değişimleri, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerin çap ve boylarında değişimlerin olduğunu, bu değişimlerin katkı oranlarına ve çevrim sayısına bağlı olarak meydana geldiğini göstermektedir. Hesaplanan hacim değişimlerine göre, en büyük mukavemet kaybının meydana geldiği 11. çevrim değerleri dikkate alındığında 0, 5, 8 ve %10 mFDM katkılı zeminlerde sırasıyla 9, 11, 7 ve 2 cm³ hacim değişimi meydana gelmiştir.

Donma çözülme çevrim sayısının artması ile katkısız (P0) zeminde, hacim önce 5. çevrime kadar azalmış, sonrasında artış göstermiştir. P5 zeminde tüm çevrimler boyunca hacimde artış, P8 zeminde 9. çevrime kadar artış, 11. çevrimde azalma göstermiştir. P10 zeminde ise hacim değişimi diğer katkı oranlarından daha farklı bir davranış sergilemiştir. 5. çevrime kadar hacim artışı, 7. ve 9. çevrimlerde hacimde azalma ve 11. çevrimde tekrar artış meydana gelmiştir. Sonuç olarak, mFDM katkı oranının artması ile hacim değişimleri meydana gelmiştir. %10 mFDM katkı ilave edilmesi ile toplamda daha az hacim değişimi meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 6.5'te sunulan ilişkiler Chen vd. (2021) tarafından Şekil 1.32'de, Chen vd. (2022) tarafından Şekil 1.42'de, Chen vd. (2023) tarafından Şekil 1.48'de incelenmiştir. Chen yapmış olduğu tüm çalışmalarda, 5, 8 ve %10 mFDM katkılarının hacim değişimini sırasıyla %9, %34 ve %39 azalttığını belirtilmiştir. Ayrıca, mFDM katkı oranı küçük olduğunda hacim değişimi üzerindeki etkisinin de küçük olduğunu, mFDM oranı %8'e çıkarıldığında hacim değişimini önemli ölçüde azalttığını ve %10 katkı oranında ölçülen hacim değişiminin belirgin olmadığını ifade etmiştir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.5 bir arada değerlendirildiğinde, katkısız zeminin artan donma çözülme çevrimlerinde daha büyük hacim değişimi gösterdiği, artan hacim değişimi davranışının mukavemeti azalttığı görülmüştür. Artan mFDM oranlarının hacim değişimini daha az değiştirdiği ve mukavemeti donma çözülme çevrimleri boyunca sabit tuttuğu belirlenmiştir. Bu davranış da mFDM katkı oranının artmasının zeminin mukavemet davranışına olumlu yönde etkisi olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.19-Şekil 3.23 arasında sunulan görüntülerde, zeminin kırılma şeklinin her bir katkı oranı ve donma çözülme çevriminde değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.19-Şekil 3.23'te de görüldüğü gibi, özellikle 11 donma çözülme çevriminde (en büyük mukavemet kaybının meydana geldiği çevrim) donma çözülme çevrimleri numunelerde yıpranma-yorulma meydana getirmiştir. Bu nedenle, numuneler çevrimlerini tamamladıktan sonra kabinden alınmasının ardından sarılı oldukları strech filminden dikkatli bir şekilde çıkarılmıştır. Şekil 3.19-Şekil 3.23'te gösterilen deney sonrası görüntülerde mFDM katkısı ile zeminin göçme şeklinin değiştiği, artan mFDM oranı ile beraber zeminde pul pul dökülerek göçme gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, beyaz renkli mFDM partikülleri de belirgin olarak

görülmektedir. Bu da mFDM'in zemin içerisine homojen olarak karıştığını kanıtlamaktadır. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde, deney sonu görüntüleri benzer şekilde Rao vd. (2019) tarafından Şekil 1.23'te, Chen vd. (2021) tarafından Şekil 1.30'da, Chen vd. (2023) tarafından Şekil 1.47'de sunulmuştur. Araştırmacılar tarafından, mFDM oranının artmasının zemin örneklerinde önemli ölçüde kırılma meydana getirdiği belirtilmiştir. Chen vd. (2021) aynı zamanda, mFDM içeriğinin artması ile göçme şekil değiştirmesinin azaldığını belirtmiştir. Bu davranışı mFDM kabuğunun belirli bir kırılma derecesine sahip polimer malzeme olması ve FDM'nin basınç dayanımının küçük olması sonucunda, zeminin kırılma eğilimini artırması şeklinde açıklamıştır (Asharf vd., 2019). Ancak, bu çalışmada mFDM oranının artması ile numunelerde kırılma gözlemlenmemiştir.

Bu durumun, numunelerin hazırlandığı su muhtevası değeri ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında, her bir mFDM oranı için kompaksiyon deneyleri yapılmış ve optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Katkısız zeminin optimum su muhtevası değeri %31,00 iken, hazırlanan katkılı deney numunelerinin optimum su muhtevası değerleri %40,00 ve %46,00'dır. Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te sunulan kompaksiyon deney sonuçlarına göre, mFDM oranının artması ile optimum su muhtevasında artış, maksimum kuru yoğunluk değerinde ise azalış meydana gelmiştir. Her bir katkı oranı (%5, %8, %10, %12) için deney numuneleri belirlenen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanmıştır. Artan optimum su muhtevası sebebi ile numuneler katkısız zemine göre daha ıslak bir yapıya sahip olmaktadır. Böylece, yüksek su muhtevasına sahip olan katkılı deney numuneleri (P5, P8, P10, P12) donma çözülme çevrimlerinin ardından, daha fazla yumuşama göstermektedir. Bu da maruz kaldıkları yükleme altında kırılma şekillerinin pul pul dökülme olarak meydana gelmesine sebebiyet vermiştir. Bahsi geçen literatür çalışmalarında ise mFDM katkılı zemin karışımlarının hazırlanma yöntemi farklıdır. Rao vd. (2021)'in çalışmasında kullanmış olduğu zeminin optimum su muhtevası değeri %15,01 iken, Chen vd. (2021) ve Chen vd. (2023)'ün %18,40'tır. Araştırmacılar, her bir mFDM için homojen karışımları oluştururken tek bir su muhtevası (w_{opt}) değerini kullanmışlardır. Bu durumda, kırılma biçimlerini tek bir su muhtevası değerinin etkisine göre gözlemlemişlerdir. mFDM oranının artmasının zemin

örneklerinde önemli ölçüde kırılabilirlik meydana getirdiği belirtmişlerdir. Bu çalışmada ise mFDM oranının artması ile numunelerde kırılabilirlik gözlemlenmemiştir. Rao vd. (2021), Chen vd. (2021) ve Chen vd. (2023)'ün dikkate aldığı optimum su muhtevası değerleri, bu tez çalışmasında kullanılan MH zeminin optimum su muhtevası değerinin yarısıdır.

Donma çözülme çevrimlerinin zeminin makro-yapısındaki değişim makro ölçekte görüntülenmiş olsa da, mikro-yapıdaki değişim yapılan SEM analizleri ve Micro CT analizleri ile incelenmiş, detaylı bir biçimde Bölüm 5'te 5.3 başlığında "Görüntü Analizleri" başlığında sunulmuştur. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan katkısız zemin (P0), katkılı zemin (P10) ve mFDM'nin SEM analizleri farklı büyütme ve ölçekler altında incelenmiş, detaylı olarak Şekil 5.5, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de sunulmuştur.

Sem analizleri diğer araştırmacılar tarafından da gerçekleştirilmiş olup Kravchenko vd. (2020) ve Kravchenko vd. (2021) tarafından Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'te, Rao vd. (2019) tarafından Şekil 1.18 ve Şekil 1.22'de, Chen vd. (2021) tarafından Şekil 1.29'da, Luo vd. (2023) tarafından Şekil 1.54'te sunulmuştur. Kravchenko vd. (2020) ve Kravchenko vd. (2021)'in yanı sıra, Rao vd. (2021), Chen vd. (2021) ve Luo vd. (2023), donma çözülme çevrimlerine maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra da görüntü analizlerini yapmış, boşluk yapılarını incelemiştir. Donma çözülme çevrimlerinin zeminin boşluk yapısını değiştirdiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla, bu tez çalışmasında da donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin yapısı incelenmiştir. Bölüm 5'te, P5 ve P8 zemin için homojen zemin karışımı hazırlanamadığı, sadece P10 zemin için homojen zemin karışımı oluşturulabildiği gerekçeleri ile birlikte anlatılmıştır. Ayrıca, yapılan serbest basınç ve tek boyutlu ödometre deneylerinde en uzun çevrim olan 11 çevrim ve en iyi performans gösteren katkı oranı olan %10 baz alınarak, katkılı (P10) ve katkısız (P0) zemin 11 çevrime maruz bırakılmış, ardından görüntü analizi gerçekleştirilmiştir. P0-0, P0-11, P10-0 ve P10-11 zemin üzerinde yapılan Micro CT analizleri Şekil 5.10-Şekil 5.21'de sunulmuştur.

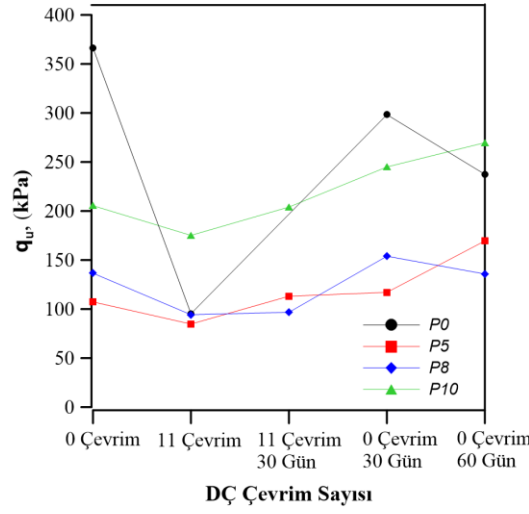
Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin yüzey ve iç yapılarındaki değişimlerin SEM analizleri ve Micro CT analizleri ile belirlenmesinin ardından, zeminin donma çözülme çevrimlerinin zeminde meydana getirdiği su muhtevası ve kütle değişimi de hesap edilmiştir. Numuneler, stretch filme sarılı olarak donma

çözülme kabinine yerleştirilmiş ve çevrimin tamamlamasından sonra dikkatli ve hassas bir biçimde strech filminden çıkarılarak ağırlıkları ve hacimleri ölçülmüştür. Donma çözülme çevrimleri zeminde hasar meydana getirerek, zeminin yorulmasına sebep olmaktadır. Çözülme sürecinde (24 saat 20 °C’de bekletilen) meydana gelen yumuşama sebebi ile strech filminden çıkarılan numunelerde bir miktar malzeme strech filme bulaşmış halde kalmaktadır. Bu malzeme miktarı çok az olup, deney numunesinin su muhtevasını değiştirmemektedir. Katkılı ve katkısız numunelerde çevrimler boyunca hesaplanan su muhtevası ve malzeme kaybı (gram olarak) Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Tablo 3.2’de sunulmuştur.

P0, P5, P8 ve P10 zeminde maksimum kayıp malzeme miktarı sırasıyla 0,70 gr, 1,80 gr, 2,40 gr ve 2,60 gr olarak hesaplanmıştır. Artan mFDM oranı ve donma çözülme çevrim sayısı ile daha fazla malzeme kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir. Aynı su muhtevası, aynı çap ve boyda hazırlanan deney numunelerinde meydana gelen bu değişimlerin en büyük sebebi, deney numunelerinin sarılı olduğu strech filminden çıkarılma aşamasıdır. Ölçülen maksimum malzeme kaybı %10 mFDM katkıli zeminde 11. çevrim sonunda 2,6 g’dır. Bu kayıplar deney numunelerinin su muhtevasında çok büyük bir değişime neden olmamıştır. Donma çözülme çevrimlerinin malzeme kütlesi üzerindeki etkisi Chen vd. (2023) tarafından Şekil 1.49’da ve Luo vd. (2023) tarafından da Şekil 1.55’te incelenmiştir. Her iki araştırmacının da elde ettiği veriler, bu çalışmada elde edilen bulguları destekleyici niteliktedir.

Tablo 3.4 ve Şekil 3.33-Şekil 3.36’da sunulan gerilme şekil değiştirme eğrileri, mFDM oranı ve donma çözülme çevrimlerine göre ayrı ayrı değerlendirilmiş ve donma çözülme çevrimlerinin zeminin uzun dönem serbest basınç mukavemetinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

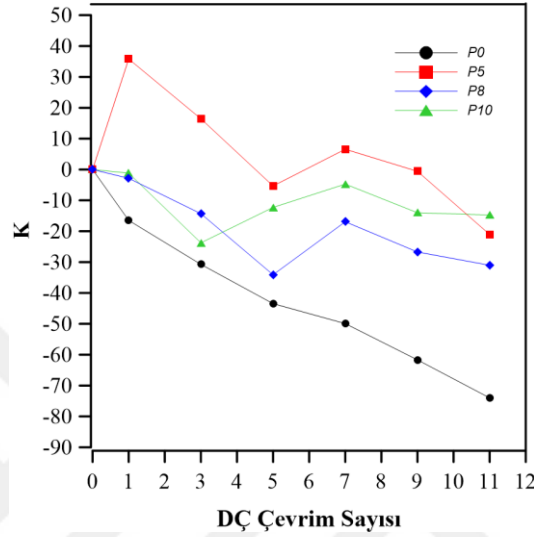
P0, P5, P8, P10 zeminin farklı koşullarda donma çözülme çevrimlerine maruz kalmaları durumunda gösterdiği kısa ve uzun süreli mukavemet davranışı Şekil 6.6’da bir arada sunulmuştur.



Şekil 6.6 Kısa ve uzun süreli serbest basınç deney sonuçları

Şekil 6.6’da sunulduğu üzere, donma çözülme çevrimleri uygulanmayan katkılı ve katkısız zeminler için en büyük mukavemet değeri P0-0 numunesinde 366 kPa olarak, en düşük mukavemet değeri P5-0 numunesinde 107 kPa olarak elde edilmiştir. 11 donma çözülme çevriminden sonra yapılan deneylerde P0-11, P5-11, P8-11 numuneleri aynı mukavemet değerini göstermiştir. 11 çevrimde en iyi mukavemet P10-11 numunesinde elde edilmiştir. Böylece, donma çözülme çevrimlerinin numunede neden olduğu olumsuzlukların %10 mFDM katkısı ile iyileştirilebileceği belirlenmiştir. 11.donma çözülme çevriminden sonra 30 gün desikatörde bekletilen numunelerin davranışı katkı oranına bağlı olarak farklılık göstermiştir. P0-11-30 numunesinde deney yapılamazken, P10-11-30 numunesi en iyi performansı göstermiştir. 5-8% mFDM katkılı deney numuneleri 11 çevrim ve sonrasında mukavemetlerinde büyük bir değişim olmadığı görülmüştür. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan numuneler 30 gün ve 60 gün bekletildiğinde de davranış katkı oranına göre farklılık göstermiştir. 5% mFDM katkısı zaman içerisinde mukavemeti artırırken, 8% mFDM katkısı tam tersi davranış göstermiştir. 10% mFDM katkılı numuneler daha iyi performans göstererek mukavemetinde artış meydana gelmiştir. Donma çözülme çevrimlerinin numunede neden olduğu olumsuzlukların %10 mFDM katkısı ile iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

Rao vd. (2021), mFDM katkılı zeminin donma önleme (antifriz) performansını değerlendirmek için, serbest basınç mukavemeti değerleri ile elde ettiği K parametresinin donma çözülme çevrimleri ile ilişkisini incelemiş ve Şekil 1.21'deki gibi sunmuştur. Önerilen (1.2) eşitliği kullanılarak hesap edilen K parametresi ve donma çözülme çevrim ilişkisi bu tez çalışmasında kullanılan zemin ve katkı oranları için de hesaplanmış Şekil 6.7'de sunulmuştur.



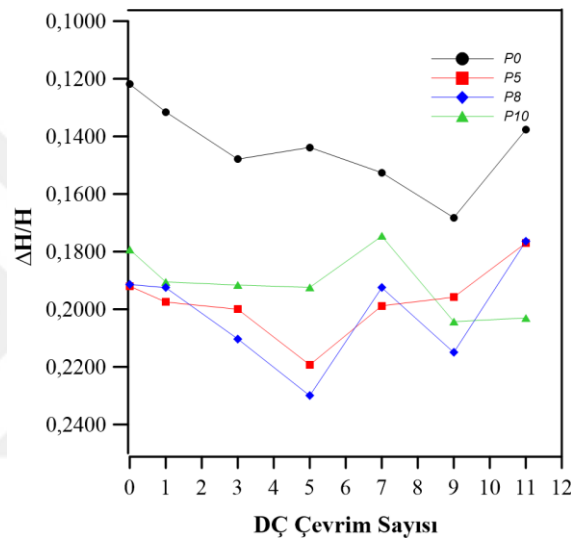
Şekil 6.7 K – DÇ çevrim ilişkisi

K değeri ile donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki Şekil 6.7'de gösterilmiştir. mFDM oranının artması ile, hesaplanan K değerinde daha az dalgalanma meydana gelmiştir. mFDM katkılı zeminin K değerindeki değişim, katkısız zeminin K değerinden daha azdır. Bu da kullanılan mFDM katkısının killi siltli (MH) zeminde donma çözülme çevrimlerinden sonra mukavemetin azalmasını etkili bir biçimde önlediğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Rao vd. (2021)'in bulguları desteklemektedir.

%5, %8, %10 oranlarında zemine ilave edilen mFDM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan/kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının oturma davranışı üzerindeki etkileri 4. Bölümde incelenmiştir. Yapılan tek boyutlu ödometre deneyleri ile mFDM katkılı zemin karışımlarının davranışı donma çözülme çevrimleri altında incelenmiştir. mFDM katkısının zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri literatürde farklı zeminler üzerinde çalışılmış olsa da, konsolidasyon davranışı hakkında herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu

çalışma, bu yönüyle zeminin konsolidasyon davranışında mFDM katkısının etkisinin incelendiği ilk çalışma olmuştur.

Yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden edilen $\Delta H/H$ -düşey efektif gerilme (σ_v') ilişkisi ve e - $\log(\sigma_v')$ ilişkisi her bir katkı oranı için ayrı ayrı olacak bir şekilde Şekil 4.5-4.12'de, her bir çevrim için ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 4.13-Şekil 4.16'da, $\Delta H/H$ değerleri ise Tablo 4.2'de sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Tablo 4.2'de sunulan ve nihai gerilme adımında elde edilen $\Delta H/H$ değerleri ile donma çözülme çevrim sayısı ilişkisi ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 4.17-Şekil 4.20'de, toplu bir biçimde Şekil 6.8'de sunulmuştur.



Şekil 6.8 $\Delta H/H$ -DÇ çevrim ilişkisi

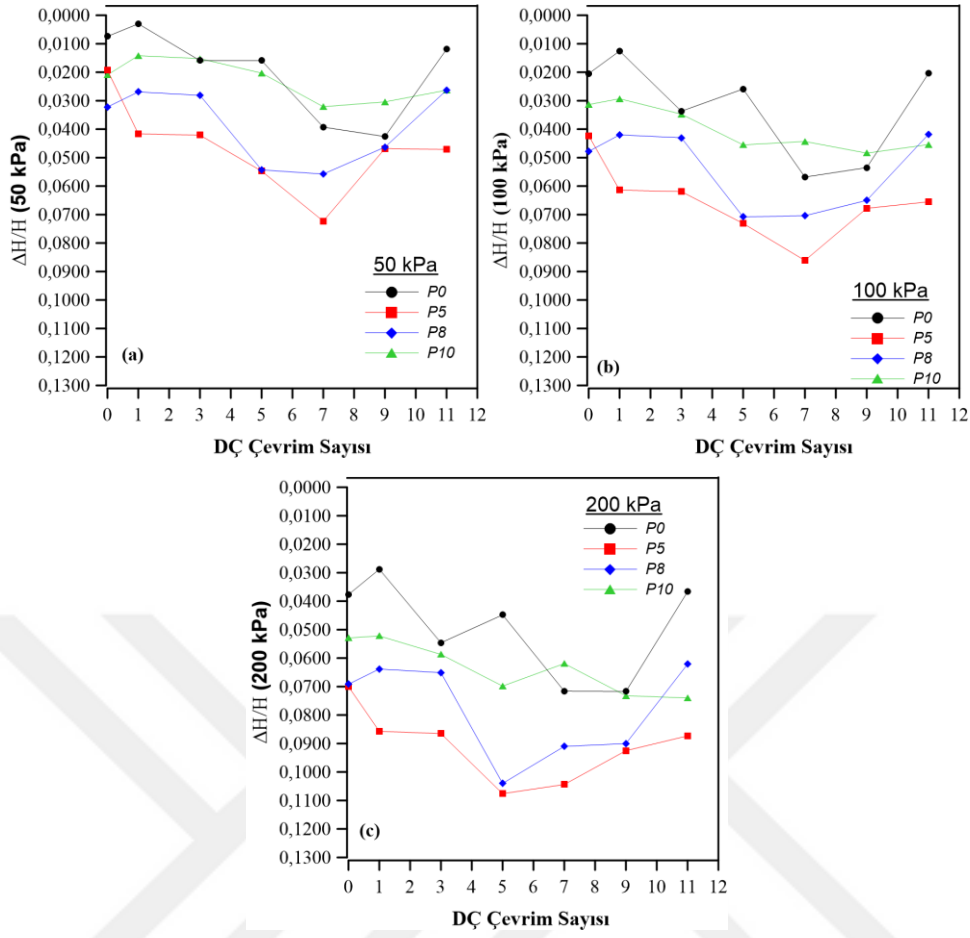
Şekil 4.5, Şekil 4.13a ve Şekil 6.8' de de görüldüğü üzere, katkısız zeminin oturması donma çözülme çevrimlerinden önemli ölçüde etkilenmiş ve artmıştır. Şekil 6.8'de donma çözülme çevrimlerinin bu olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması için zemine katılan mFDM katkısının oturmaları etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.13a ve Şekil 6.8 birlikte değerlendirildiğinde, P5-0 ve P8-0 numunelerinin $\Delta H/H$ değerleri P0-0 numunesine göre %58, P10-0 numunesinin $\Delta H/H$ değeri P0-0 numunesine göre %47 kadar artmıştır.

Katkısız zeminde $\Delta H/H$ değeri P0-0 zemin için 0,1219'dur. 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma çözülme çevrimlerinden sonra $\Delta H/H$ değerleri sırasıyla %7, %18, %15, %20, %27, %11 artarak önemli miktarda oturma meydana gelmiştir. Katkısız zemin için en büyük oturma değeri %27 mertebesinde 9. çevrimde olmuştur.

Donma çözülme çevrimlerinin zeminin oturmasını önemli ölçüde etkilediği, çevrim sayısına bağlı olarak daha büyük oturma değerleri elde edildiği Ozgan vd. (2015), Lerouil vd. (1991), Sterpi (2015), Mahmutluoglu ve Bağrıaçık (2020), Paudel ve Wang (2010) tarafından yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada da, donma çözülme çevrimine maruz kalan zeminler daha büyük oturma davranışı göstermiştir. Ancak, artan donma çözülme çevrim sayısına göre düzenli olarak artış görülmemektedir. Bu durumun, konsolidasyon deney numunelerinin alındığı tabakalara bağlı olduğu düşünülmektedir. Katkısız zemin için konsolidasyon numunelerinin alındığı tabakalar çevrim sayısına bağlı olarak sırasıyla orta, alt, orta, orta, üst, üst şeklindedir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 ve Şekil 6.8 birlikte değerlendirildiğinde; P5, P8, P10 zeminin her bir çevrim sonunda elde edilen $\Delta H/H$ değerlerinin P0 zeminin $\Delta H/H$ değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Ancak, P5 ve P8 zeminin donma çözülme çevrimleri boyunca elde edilen $\Delta H/H$ değerleri yaklaşık aynıdır. P5 ve P8 zeminin oturma davranışı ve 9. çevrim haricindeki çevrimlerde meydana gelen oturma miktarları birbirine oldukça yakındır. mFDM oranı %10 olması durumunda $\Delta H/H$ değerlerinde iyileşme görülmüştür. Herbir çevrim sonunda elde edilen değerler P5 ve P8 zemine göre daha azdır. Bu durum, 10% mFDM katkısının MH zemin ile uyum sağladığını ve zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden oturma değerinin sabit tutulabildiğini göstermektedir. Böylece, mFDM zemin içine katıldığında donma çözülme çevrimlerinde oturmaların etkilenmeden kalabildiği belirlenmiştir. P10-11 numunesinin maksimum %13 artan oturması ile performansını diğer katkı oranlarına göre bir miktar daha koruduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, mFDM katkısının ısı verme-alma özelliği ile donma çözülme çevrimleri sırasında zeminin oturmasında meydana gelen olumsuz değişimleri etkili bir biçimde azalttığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.1’de sunulan ve tek boyutlu ödometre deneylerinde nihai yükleme değeri olan 1600 kPa değerinde elde edilen $\Delta H/H$ değerlerinin tüm katkı oranları için değerlendirilmesi detaylı bir biçimde yapılmıştır. Buna ilave olarak, Şekil 6.9a, Şekil 6.9b ve Şekil 6.9c’de, mFDM ilave edilmiş zemin üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinde uygulanan 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa gerilme değerlerinde elde edilen $\Delta H/H$ değeri ile uygulanan donma çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



a) 50 kPa, b) 100 kPa, c) 200 kPa

Şekil 6.9 $\Delta H/H$ -DÇ ilişkisi

Şekil 6.9a, Şekil 6.9b ve Şekil 6.9c’de verilen ve tek boyutlu ödometre deneylerinde uygulanan nihai gerilme değerinden (1600 kPa) daha düşük gerilmelerde (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa) elde edilen $\Delta H/H$ değerleri incelendiğinde, mFDM katkısının deformasyonları dar bir aralıkta değiştirdiği görülmektedir. Bu da, mFDM katkısının donma çözülme çevrimleri sırasında zeminin oturmasında meydana gelen olumsuz değişimleri düşük konsolidasyon gerilmeleri altında etkilediğini göstermektedir. Artan konsolidasyon gerilmeleri altında meydana gelen değişimlerin sebebi ise mikrokapsüllerin patlamasıdır. Özellikle %10 mFDM katkısı, zeminin serbest basınç mukavemetinde olduğu gibi oturmasında da başarılı olduğunu göstermiştir.

Oturma davranışında etkili olan faktörlerden biri de malzemenin donma çözülme çevrimleri sonundaki ağırlık ve su muhtevası değerlerinde meydana gelen değişimlerdir. Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin ilgili

çevrimler sonundaki su muhtevası değerleri ve meydana gelen kütle kaybı, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Tablo 4.3'te sunulmuştur. Numuneler strech filme sarılı olarak donma çözülme kabineye yerleştirilmiş ve çevrimin tamamlamasından sonra dikkatli ve hassas bir biçimde strech filminden çıkarılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Donma çözülme çevrimleri zeminde hasar meydana getirerek, zeminin yorulmasına sebep olmaktadır. Şekil 4.22-Şekil 4.25'te bu durum açık bir biçimde görülmektedir. Donma sürecinde (24 saat -20 °C'de bekletilen) meydana gelen genişleme, çözülme sürecinde (24 saat +20 °C'de bekletilen) meydana gelen büzülme sebebi ile numunelerin Şekil 4.1'deki metal/çelik ringlerden ayrılması söz konusu olmuştur (Şekil 4.29). Ancak malzeme kaybı miktarı çok az olup, deney numunesinin su muhtevasını değişmemiştir. P0, P5, P8 ve P10 zeminde maksimum kayıp malzeme miktarı sırasıyla 0,40 gr, 1,70 gr, 1,80 gr ve 1,10 gr olarak hesaplanmıştır. Artan mFDM oranı ve donma çözülme çevrim sayısı ile daha fazla malzeme kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir. Ölçülen maksimum malzeme kaybı P8-9 numunesinde olup 1,80 g'dır. Bu kayıplar deney numunelerinin su muhtevasında çok büyük bir değişime neden olmamıştır (Şekil 4.27).

Sonuç olarak, artan donma çözülme çevrimleri katkısız zeminin $\Delta H/H$ değerlerinde önemli miktarda artışa neden olmuştur. mFDM katkısı ile zeminin başlangıç oturma değeri artsa da, donma çözülme çevrimlerindeki oturma miktarları korunmuştur. Artan mFDM katkı oranı oturma değerlerinde azalma sağlamış ve özellikle mFDM oranının %10 olması ile numunenin donma çözülme çevrimlerinde daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

%5, %8, %10 oranlarında zemine ilave edilen mFDM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan mFDM'li zemin karışımlarının hidrolik iletkenlik davranışı üzerindeki etkileri 4. Bölümde incelenmiştir. Bu amaçla yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyleri ile elde edilen permeabilite katsayısı (k) değerleri mFDM oranına bağlı olarak Tablo 4.4, Şekil 4.33-Şekil 4.36'da detaylı bir biçimde sunulmuş, mFDM ilave edilmesinin zeminin permeabilite katsayısında herhangi bir değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Tablo 1.8'de de sunulduğu üzere mFDM'nin zeminin hidrolik iletkenlik davranışı üzerindeki etkisi Liu vd. (2021) tarafından incelenmiş, elde edilen bulgular Şekil 1.36'da sunulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında yapılan düşen seviyeli permeabilite deneylerinden elde edilen bulgular Liu vd. (2021)'in sonuçlarını desteklemektedir.

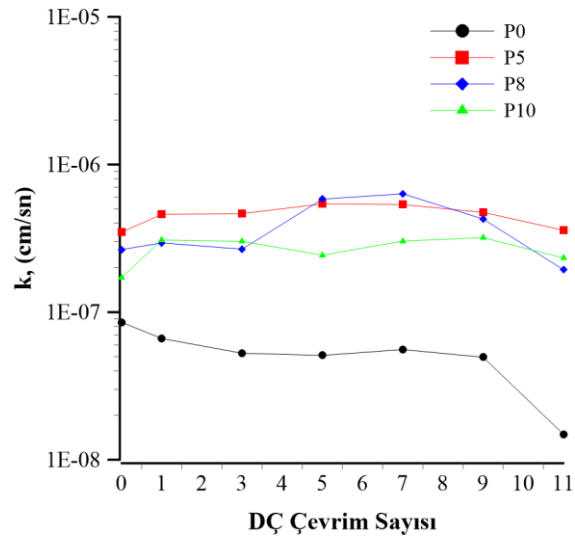
Donma çözülme çevrimlerinin zeminin permeabilitesine etkisi ilk olarak Chamberlain ve Gow (1979) tarafından incelenmeye başlanmıştır. Özel sistem ile yapmış oldukları permeabilite deneylerinde aynı anda konsolidasyon yüklemesi yapıp, e-boşluk oranı ölçüp, boşluk oranlarından permeabilite katsayısı hesap etmişlerdir. Bu şekilde yapmış oldukları çalışmalarında permeabilite deneyleri çok kısa (birkaç gün) sürmüştür.

Viklander (1998), Kim ve Daniel (1992), Proskin vd. (2010), Yıldız ve Soğancı (2012), Paudel ve Wang (2010), Sterpi (2015) ve bazı araştırmacılar hem Chamberlain ve Gow (1979)'un bu özel sistemini hem de hala yapılmakta olan klasik düşen seviyeli deney sistemini tercih etmişlerdir. Araştırmacılardan Sterpi (2015), çelik kalıpların kullanıldığı klasik permeabilite deneylerinin çok uzun sürdüğünü bu sebeple permeabilite katsayısının konsolidasyon deney sonuçlarından hesap edilmesinin yeterli olduğunu belirtmiş, deney sonuçlarını bu şekilde hesaplayarak sunmuştur. Düşen seviyeli permeabilite deneyi sonucu ile ödometre sonuçlarından elde ettiği c_v değeri ile hesapladığı permeabilite katsayısının birbirini desteklediğini belirtmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ve öneriler göz önüne alındığında sadece P0-0, P5-0, P8-0, P10-0 zemin için uzun süreli düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır (Tablo 4.4 ve Şekil 4.37, Şekil 4.38). Yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden elde edilen e-log (σ_v') ilişkiler kullanılarak da Taylor yöntemine göre konsolidasyon katsayısı (c_v) hesaplanmıştır. Her bir mFDM katkı oranı, donma çözülme çevrim sayısı ve gerilme değeri için hesap edilen c_v değerleri kullanılarak, permeabilite katsayısı (k)'na geçiş yapılmıştır. Hesap edilen k değerleri tüm katkı oranları için Tablo 6.1 ve Şekil 6.10'da sunulmuştur.

Tablo 6.1 k değerleri

<i>Numune İsmi</i>	<i>k, (cm/s)</i>	<i>Numune İsmi</i>	<i>k, (cm/s)</i>
P0-0	8,53644E-08	P5-0	3,48027E-07
P0-1	6,62719E-08	P5-1	4,59646E-07
P0-3	5,26355E-08	P5-3	4,64807E-07
P0-5	5,09323E-08	P5-5	5,40658E-07
P0-7	5,57887E-08	P5-7	5,3531E-07
P0-9	4,94941E-08	P5-9	4,7445E-07
P0-11	1,48549E-08	P5-11	3,58584E-07
<i>Numune İsmi</i>	<i>k, (cm/s)</i>	<i>Numune İsmi</i>	<i>k, (cm/s)</i>
P8-0	2,65259E-07	P10-0	1,71512E-07
P8-1	2,94319E-07	P10-1	3,07961E-07
P8-3	2,67071E-07	P10-3	3,01673E-07
P8-5	5,82779E-07	P10-5	2,43357E-07
P8-7	6,33402E-07	P10-7	3,02796E-07
P8-9	4,2683E-07	P10-9	3,1943E-07
P8-11	1,93711E-07	P10-11	2,32856E-07



Şekil 6.10 k-DÇ ilişkisi

Tablo 6.1’de sunulan ve donma çözülme çevrimlerine maruz kalmayan katkılı ve katkısız zemin üzerinde yapılan düşen seviyeli permeabilite deney sonuçlarından mFDM katkısının zeminin permeabilite katsayısında herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermediği sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 6.1 ve Şekil 6.10 birlikte değerlendirildiğinde; tüm katkı oranları (P0, P5, P8, P10) ve tüm çevrimler (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11) için hesap edilen c_v değerlerinin 10^{-7} mertebesinde olduğu görülmektedir. Artan donma çözülme çevrimlerinde de permeabilite katsayısı değerlerinde herhangi bir değişim meydana gelmemiştir.

Yapılan tüm bu deneysel çalışmalarda donma çözülme çevrimleri için uygulanan sınır sıcaklık değerleri (-20 C° ve $+20\text{ C}^\circ$) kabin içerisinde manual/otomatik olarak ölçülüyor olsa da, numunelerin donma çözülme gösterip göstermediğinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan sıcaklık ölçümleri Bölüm 5’te “Sıcaklık Analizleri” başlığında Şekil 5.15’te sunulmuştur. Benzer şekilde sıcaklık ölçümleri Mahedi vd. (2019) tarafından Şekil 1.10’da, Kravchenko vd. (2020) tarafından Şekil 1.13’te, Rao vd. (2021) tarafından Şekil 1.24’te, Liu vd. (2021) tarafından Şekil 1.37’te sunulmuştur. Elde edilen veriler literatürü desteklemektedir.

mFDM’nin çalışma ortamının sıcaklık değerleri arasında faz değiştirme özelliği göstermesi, çalışmadan çıktı alınabilmesi açısından önem arz etmektedir. Çünkü, mFDM’nin faz değiştirme özelliğinin kullanılabileceği sıcaklık aralıklarının çalışma ortamına uygunluğu, çalışmayı anlamlı kılmaktadır. Uygulanan sınır şartları arasında faz değiştirme özelliği göstermeyen mFDM’nin çalışmalarda kullanılması herhangi bir olumlu etki yaratmayacak, aksine zaman, maliyet ve performans açısından olumsuz durum oluşturabilecektir. Böyle bir durumda, mFDM’den olumlu bir performans beklenmemelidir. Bu amaçla gerçekleştirilen DSC analizleri gerçekleştirilmekte ve uygun faz değiştirme sıcaklık aralıkları belirlenmektedir. DSC analizlerinin yanı sıra, mFDM’nin ilave edileceği yapı malzemesine uyumluluğu, herhangi bir kimyasal aktivite gerçekleşebilmesi ve olumsuz sonuçlar doğurabilmesinin öngörülebilmesi açısından FT-IR analizleri önem arz etmektedir. Bu amaçla, mFDM, MH zemin ve %10 mFDM katkılı zemin üzerinde FT-IR analizleri gerçekleştirilmiş, mFDM’nin zemine ilave edilmesi ile kimyasal bir reaksiyon olup olmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 5.4’te sunulmuştur. yapılan FT-IR analizleri ile mFDM ile zeminin herhangi bir kimyasal reaksiyona girmediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, %10 mFDM katkılı

zemin karışımında elde edilen pikler incelendiğinde, %10 katkı oranının tam olarak homojen bir karışım oluşturduğu analiz sonuçlarındaki piklerde ve piklere karşılık gelen bağlarda gözlemlenmiştir. FT-IR analizleri, literatürde sadece Rao vd. (2021) tarafından Şekil 1.17 ve Tablo 1.6’da, Luo vd. (2023) tarafından Şekil 1.51’de sunulduğu gibi incelenmiştir.



MODEL DENEYLER ve SAYISAL MODELLEME

7.1 Model Deneyler

Donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin mikro ve makro yapısındaki değişimler literatürde detaylı bir biçimde incelenmiş ve Bölüm 1’de kronolojik olarak sunulmuştur. Aynı zamanda, zeminlerin donma çözülme çevrimleri sonundaki mukavemet, oturma, permeabilite özelliklerinde meydana gelen olumsuz durumlar için yapılan iyileştirme çalışmaları da aynı bölüm içerisinde sunulmuştur. Literatürde kullanılan klasik katkı malzemelerinin aksine yeni bir katkı malzemesi olan FDM’nin donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminin davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine yapılan bu tez çalışmasında farklı katkı oranlarında mFDM kullanılarak, en iyi performans sağlayan katkı oranı belirlenmiştir. Yapılan serbest basınç ve tek boyutlu ödometre deneylerinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en olumsuz koşullarda (11 çevrim) dahi en iyi performans sağlayan katkı oranının %10 olduğu belirlenmiştir.

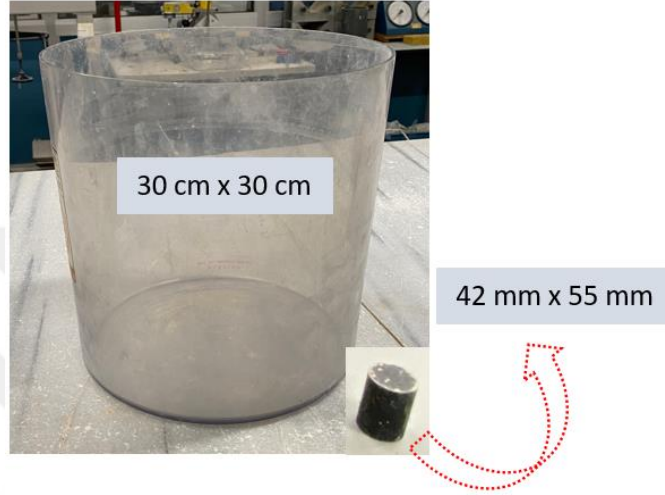
Yapılan laboratuvar deneyleri ile gözlemlenen en olumsuz koşul ve en iyi performans sağlayan katkı oranı göz önünde bulundurularak, laboratuvarda küçük ölçekli model deneyler yapılmıştır. Model deneylerin sonuçlarının kolay incelenebilmesi ve takibinin kolay yapılabilmesi için katkı oranı ve donma çözülme çevrim sayısı dikkate alınarak deneylerin isimlendirilmesi (kodlaması) yapılmış ve Tablo 7.1’de sunulmuştur.

Tablo 7.1 İsimlendirme

<i>Donma Çözülme (DÇ) Çevrim Sayısı</i>		
<i>mFDM Oranı, (%)</i>	<i>0</i>	<i>11</i>
<i>0</i>	Model 1 (P0-0)	Model 3 (P0-11)
<i>10</i>	Model 2 (P10-0)	Model 4 (P10-11)

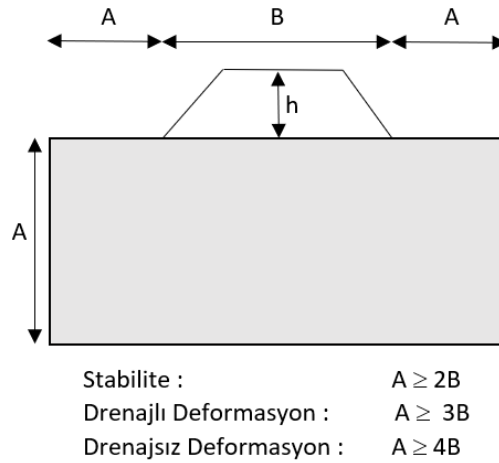
Tablo 7.1’de yapılan isimlendirmede, Model 1 olarak adlandırılan deney, katkısız zemini ve çevrimsiz deney koşullarını temsil etmektedir.

Model deneylerde Şekil 7.1’deki gibi 30 cm x 30 cm ölçülerinde altı kapalı şeffaf bir plexiglass ile 42 mm x 55 mm ölçülerinde 500 gr’lık bir yükleme ağırlığı kullanılmıştır.



Şekil 7.1 Model deneylerde kullanılan plexiglass ve yükleme ağırlığı

Şekil 7.1’de sunulan görseldeki plexiglass ve yükleme ağırlığının seçiminde Şekil 7.2’de sunulan sınır şartları göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 7.2 Sınır şartları (Brinkgreve (2005))

Şekil 7.2’de belirtilen “*stabilite, drenajlı deformasyon ve drenajsız deformasyon*” koşullarından “*drenajlı deformasyon*” koşulu seçilmiştir. Bu kapsamda, 30 cm çap ve 30 cm yüksekliğinde olan plexiglass hücre için 42 mm çapında bir yükleme ağırlığı seçilmesi yeterli ve uygun görülmüştür.

Model deneylerde kullanılan hücre ve yükleme ağırlığının ölçüleri (çap ve boy) Şekil 7.2’deki sınır koşullarına göre belirlendikten sonra, Bölüm 2’de “2.1.1. Numune Hazırlama Metodu” başlığında yer alan adımlar izlenerek katkılı (P10) ve katkısız (P0) zemin numuneleri hazırlanmıştır. Laboratuvarında yapılan serbest basınç, tek boyutlu ödometre ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri için izlenen tüm süreç (optimum su muhtevalarında numune hazırlanması, deney öncesi ve sonrası fotoğrafları, su muhtevası ölçümü vb.) model deneyler için de uygulanmıştır.

Tablo 2.14’te sunulan optimum su muhtevası değerleri baz alınarak, yaklaşık 30 kg katkılı (%10 mFDM) ve katkısız (%0 mFDM) zemin plexiglass içerisine kompakte edilmek üzere hazır hale getirilmiştir (Şekil 7.3). Malzeme ağırlığının hesap edilmesinde Tablo 2.14’te sunulan kuru birim hacim ağırlık ve plexiglass hücrenin hacmi kullanılmıştır.



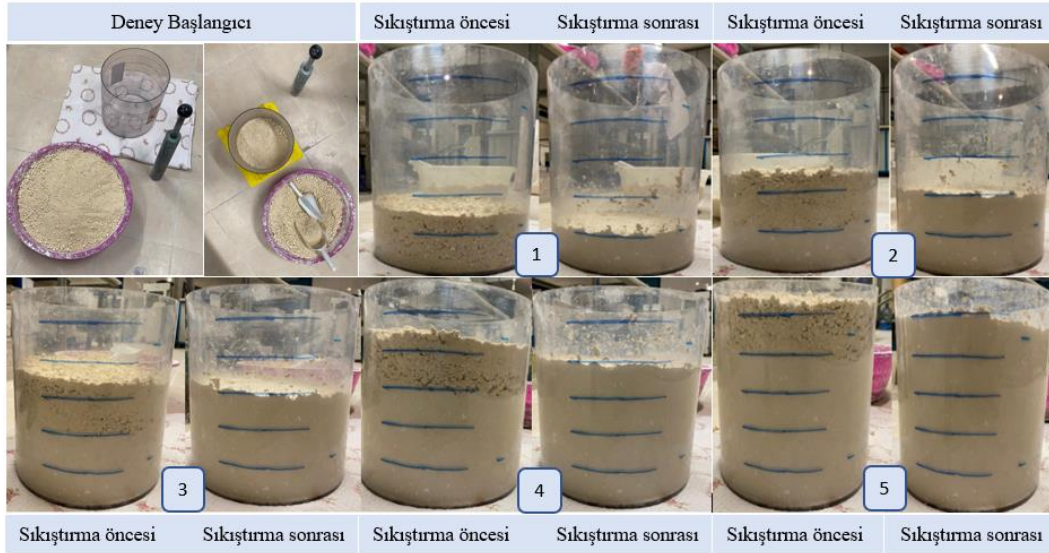
Şekil 7.3 Model deneyler için malzeme hazırlanması

30 cm x 30 cm ebatlarındaki plexiglass hücresi içerisinde standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak kompakte edilecek katkılı (P10) ve katkısız (P0) zemin için, tabaka/vuruş sayısının belirlenebilmesi amacıyla (7.1) eşitliğinde gibi enerji hesabı yapılmıştır.

$$E = \frac{\text{Tokmak ağırlığı} \times \text{Düşme yüksekliği} \times \text{Tabaka sayısı} \times \text{Vuruş Sayısı}}{\text{Kalıp hacmi}} \quad (7.1)$$

$$E = \frac{2.50 \text{ kg} \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times (0.30 \text{ m}) \times 5 \times 254}{17.662,5} = 530 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

(7.1) eşitliği kullanılarak yapılan hesaplarda vuruş sayısı 254/tabaka olarak elde edilmiştir. Şekil 7.3'teki gibi optimum su muhtevasında hazırlanan zemin plexiglass içerisinde 5 tabaka halinde ve her bir tabakaya 254 vuruş yapılacak şekilde standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Plexiglass içerisinde yapılan kompaksiyon aşamaları her bir tabaka için (sıkışma öncesi ve sıkışma sonrası) Şekil 7.4'te sunulmuştur.



Şekil 7.4 Kompaksiyon adımları

Şekil 7.4'te sunulan sıkıştırma öncesi ve sıkıştırma sonrası görüntülerinde, her bir tabakanın sıkışma sonundaki kalınlığının eşit olması ve bunun sağlıklı bir biçimde kontrol edilebilmesi amacıyla plexiglass mavi ve kırmızı bir kalem ile eşit parçalara bölünmüş ve işaretlenmiştir. Tabaka kalınlığına karar verilme aşamasında ise yine Şekil 7.2'de sunulan sınır koşullarından “*drenajlı deformasyon*” koşulu baz alınmıştır. 42 mm çapındaki yükleme ağırlığı için minimum koşul olan $A \geq 3B$ eşitliğinde B değeri 42 mm iken A değerinin minimum 12.6 cm olması yeterli olmaktadır. Gerek plexiglass hücrenin yüksekliği (30 cm), gerek plexiglassın yükleme cihazına konulduğunda yük aktarma parçasının boyu (11 cm) sebebiyle sıkıştırılacak zeminin yüksekliğinin 25 cm olması gerektiği, bunun yeterli ve uygun

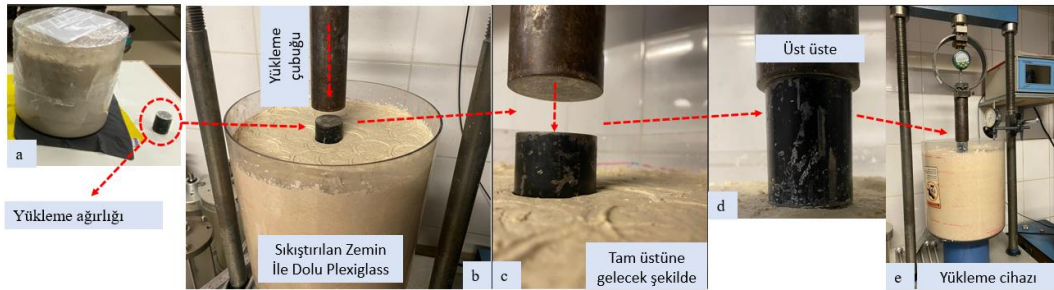
olduğuna karar verilmiştir. Bu amaçla, plexiglass 5 cm olacak şekilde 5 eşit parçaya bölünerek tabaka kalınlıkları belirlenmiştir.

Tablo 7.1’de sunulan 4 model de şekil 7.4’teki gibi sıkıştırılarak deneylere hazır hale getirilmiştir. şekil 7.4’teki gibi hazırlanan ve donma zlme çevrimlerine maruz bırakılmayan Model 1 ve Model 3 hazırlandıkları anda yüklemeye tabi tutulmuştur. şekil 7.4’teki gibi hazırlanan Model 2 ve Model 4 ise hazırlandıkları su muhtevalarını ($w_{opt}=\%35,00$ ve $w_{opt}=\%40,00$) kaybetmeyecek şekilde stretch filme sarılarak donma zlme çevrimlerine hazır hale getirilmiş ve şekil 2.12’deki donma zlme kabinine yerleştirilmiştir (şekil 7.5).



şekil 7.5 Numunelerin donma zlme çevrimlerine hazır hale getirilmesi

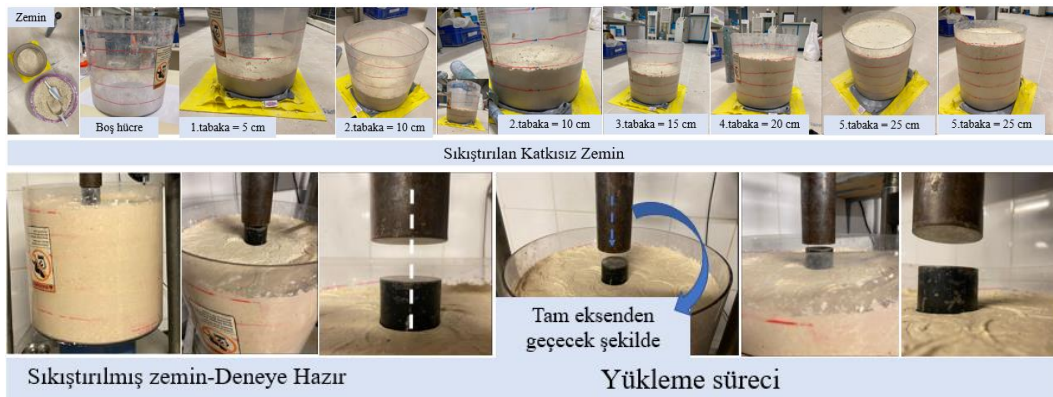
şekil 7.5’teki gibi donma zlme kabinine yerleştirilen ve 11 çevrime maruz bırakılan Model 2 ve Model 4, 11 evrim (22 gün)’in tamamlanmasının ardından yüklemeye tabi tutulmuştur. Tablo 7.1’de yer alan 4 model de hazırlanma ve ilgili çevrim süreçlerinin tamamlanmasının hemen ardından şekil 7.6’da verilen adımlar izlenerek yükleme cihazına yerleştirilmiştir.



şekil 7.6 Yükleme adımları

Şekil 7.1 ve Şekil 7.6a’da da gösterilen yükleme ağırlığı, herhangi bir güç uygulanmadan, hazırlanan zemin dolu plexiglassın tam merkezinden geçecek şekilde zemin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7.6b). Yükleme çubuğu (yük aktarma parçası), yükleme ağırlığının tam üzerine gelecek şekilde hizalanmıştır (Şekil 7.6c ve 7.6d). Yükleme çubuğu ve yükleme ağırlığı üst üste geldiği anda yükleme başlatılmış ve 0,5 mm/dk hız ile yükleme yapılmıştır (Şekil 7.6e). Yükleme sistemine yerleştirilen ve konumlandırılan zeminin yük altında 2-2,5 cm penetrasyon değeri (yükleme ağırlığının boyununu yarısı)’na kadar yüklenmesine müsaade edilmiştir. Hedeflenen penetrasyon değerine ulaşılmasının ardından, yükleme durdurulmuş ve deney tamamlanmıştır. Deneyin tamamlanmasının hemen ardından, plexiglass içindeki zemin boşaltılarak, her bir tabakadan su muhtevası alınmıştır. Böylece donma çözülme çevrimleri boyunca meydana gelen su muhtevasındaki değişim derinlik ile ilişkilendirilmiştir. Yapılan yükleme deneyleri sonunda yük - (şekil değiştirme) penetrasyon (cm) davranışı incelenmiştir. Yükleme süresi boyunca okumalar manual olarak alınmıştır.

Tablo 7.1’de yer alan 4 model için de tüm numuneler aynı şekilde hazırlanmış, tüm deney numunelerinin deney kabineine yerleştirilmeden önce, kabinden alındıktan sonra, yükleme öncesi ve yükleme sonrası görüntüleri çekilmiştir. Böylece, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan deney numunelerinin kabinden önceki ve sonraki durumları gözlemlenerek, donma çözülme çevrimlerinin numunenin yan ve üst yüzeyinde yarattığı hasar derecesi de incelenmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası tüm görüntüler Model 1 için Şekil 7.7’de, Model 2 için Şekil 7.8’de, Model 3 için Şekil 7.9’da, Model 4 için 7.10’da sunulmuştur.

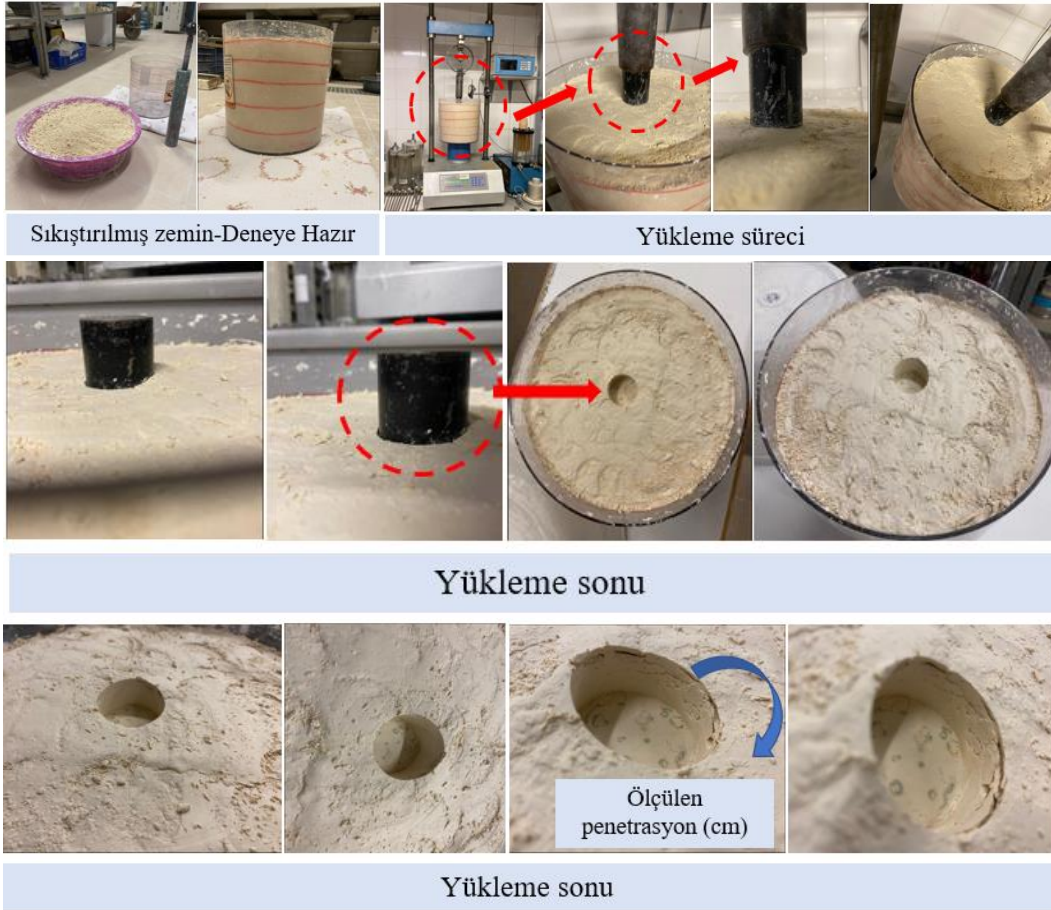


Şekil 7.7 Model 1 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler



Şekil 7.7 Model 1 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler (devamı)

Şekil 7.7, katkısız zeminin (P0) hazırlanma sürecini göstermektedir. Eşit tabakalar halinde kompakte edilen P0 zemin, herhangi bir çevrime maruz bırakılmadan (P0-0), hazırlandığı gün yüklemeye tabi tutulmuştur. Herhangi bir donma çözülme çevrimine maruz bırakılmayan zeminin üst veya yan yüzeylerinde herhangi bir değişim/hasar gözlemlenmemiştir.



Şekil 7.8 Model 2 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler

Şekil 7.8, katkılı zeminin (P10) hazırlanma sürecini göstermektedir. Eşit tabakalar halinde kompakte edilen P10 zemin, herhangi bir çevrime maruz bırakılmadan (P10-0), hazırlandığı gün yüklemeye tabi tutulmuştur. Herhangi bir donma çözülme

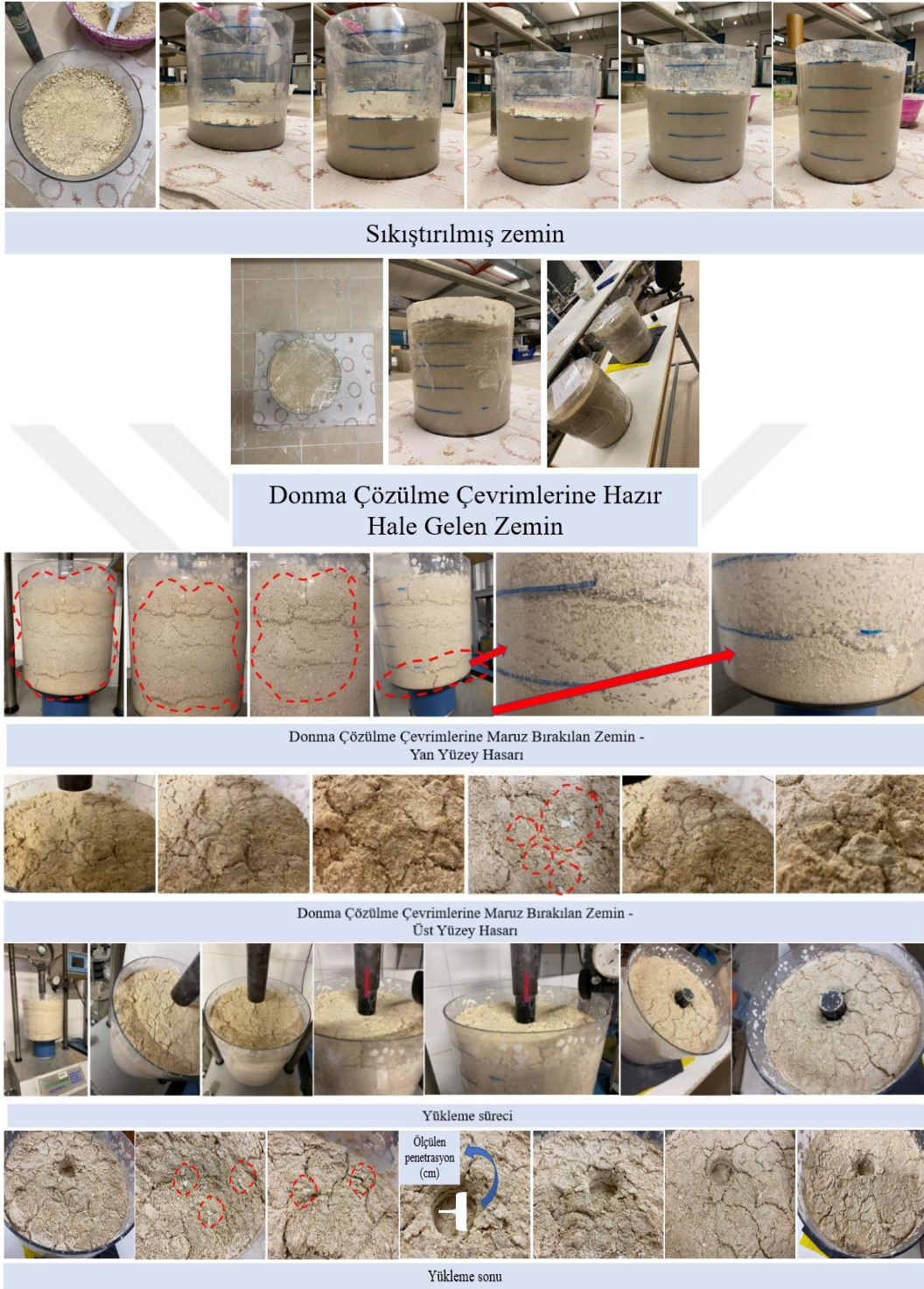
çevrimine maruz bırakılmayan zeminin üst veya yan yüzeylerinde herhangi bir değişim/hasar gözlemlenmemiştir.



Şekil 7.9 Model 3 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler

Şekil 7.9, katkısız zeminin (P0) hazırlanma sürecini göstermektedir. Eşit tabakalar halinde kompakte edilen P0 zemin, su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde stretch filme sarılarak, 11 çevrime maruz bırakıldıktan sonra (P0-11), yüklemeye tabi tutulmuştur. 22 gün süren donma çözülme çevrimlerinin tamamlanmasının ardından zeminin üst ve yan yüzeylerinde hasar meydana gelmiştir. Üst yüzeyinde meydana gelen hasar, kenarlardan başlayarak ortalara doğru, yan yüzeylerinde

meydana gelen hasar ise plexiglassın üst kısımlarından başlayarak alt kısımlara doğru hafiflemiştir.

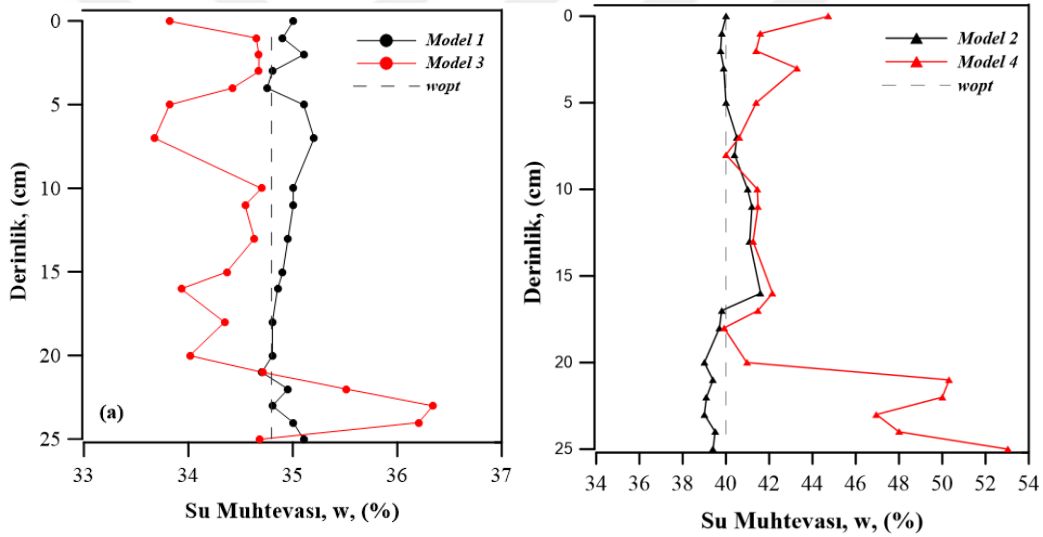


Şekil 7.10 Model 4 için deney öncesi ve deney sonrası görüntüler

Şekil 7.10, katkılı zeminin (P10) hazırlanma sürecini göstermektedir. Eşit tabakalar halinde kompakte edilen P10 zemin, su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde stretch filme sarılarak, 11 çevrime maruz bırakıldıktan sonra (P10-11), yüklemeye tabi

tutulmuştur. 22 gün süren donma çözülme çevrimlerinin tamamlanmasının ardından zeminin üst ve yan yüzeylerinde hasar meydana gelmiştir. Üst ve yan yüzeylerinde meydana gelen hasar, Model 3'teki dağılımın aksine tüm plexiglass boyunca gözlemlenmiştir. Model 3 ile karşılaştırıldığında, Model 4'teki hasar boyutunun daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, donma çözülme çevrimleri tamamlanan P10 zeminin yüzeyinde ciddi bir yumuşama, pul pul dağılma, yükleme ağırlığının konulması ile zeminde gözle görülebilir bir oturma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Model deneylerin yüklemelerinin tamamlanması ile plexiglassdaki zemin boşaltılmıştır. Zeminin boşaltılması sırasında her bir tabakadan su muhtevası alınmıştır. Alınan su muhtevasının, derinlikle değişimi Model 1 ve Model 3 için Şekil 7.11a'da Model 2 ve Model 4 için Şekil 7.11b'de sunulmuştur.



(a) Model 1 ve Model 3, (b) Model 2 ve Model 4

Şekil 7.11 Su muhtevası – derinlik ilişkisi

Şekil 7.11a ve Şekil 7.11b'de her bir model için deneylerin sonunda ölçülen su muhtevası değerlerinin derinlikle değişimi sunulmuştur. Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmayan %34,80 su muhtevası değerinde hazırlanan Model 1 ile %40,00 su muhtevası değerinde hazırlanan Model 2'nin ölçülen deney sonu su muhtevası değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu durum, deney numunesinin hazırlanmasının hemen ardından deneylerin aynı gün içerisinde gerçekleştiğini ve deney numunesinin su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde korunduğunu, gerekli önlemlerin alındığını göstermektedir.

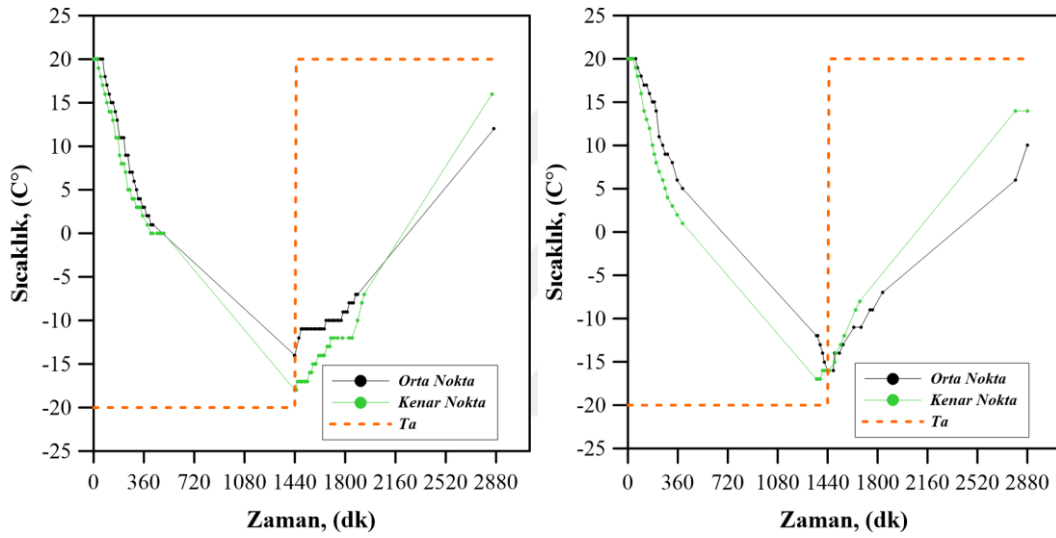
Donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılan %34,80 su muhtevası değerinde hazırlanan Model 3 ile %40,00 su muhtevası değerinde hazırlanan Model 4'ün ölçülen deney sonu su muhtevası değerlerinde sırasıyla $\pm 1,54$ ve $+13,00$ değişim meydana gelmiştir. Her iki model için de plexiglassın alt tabakalarına inildikçe su muhtevasının arttığı görülmektedir. Bunun sebebinin donma çözülme süreçlerinde eriyen suyun aşağı yönlü hareketidir. Model 4'te meydana gelen su muhtevasındaki büyük artışın ($+13,00$) sebebinin ise, kompaksiyon sırasında mikrokapsüllerin patlamış olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Model 4'ün su muhtevasının daha fazla (%40,00) olması sebebi ile donma çözülme çevrimlerinden fiziksel olarak daha çok etkilenmesidir.

Bu tez çalışmasında uygulanan donma çözülme çevrimleri için sınır sıcaklık değerleri Şekil 2.13'te sunulmuştur. Uygulanan sıcaklık değerleri (-20 C° ve $+20\text{ C}^\circ$) Şekil 2.12'de görseli sunulan donma çözülme kabini içerisinde manual/otomatik olarak ölçülüyor olsa da, kabin içerisindeki numunelerin de hedeflenen sıcaklık değerlerine ulaşp ulaşmadığının yapılacak sıcaklık ölçümleri ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, her bir katkı oranı (%0, %5, %8, %10) için serbest basınç numuneleri alınmış, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te görseli, Tablo 5.3'te çalışma ve ölçüm sıcaklık değerleri sunulan thermocouple cihazı kullanılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Serbest basınç deney numuneleri üzerinde yapılan sıcaklık ölçümlerinden elde edilen veriler Şekil 5.25'te sunulmuştur. Model deneylere göre daha küçük ebatlara sahip olan serbest basınç deney numunelerinin (3,5 cm x 7 cm) hedeflenen donma çözülme sınır sıcaklık değerlerine ulaştığı görülmüştür. Aynı ölçümlerin model deneyler için de yapılması gerektiğinden, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te görseli verilen thermocouple Şekil 7.12'deki gibi katkılı ve katkısız olarak hazırlanan zemine yerleştirilmiştir.



Şekil 7.12 Sıcaklık ölçümleri-model deneyler

Model deneyler katkısız (%0 mFDM) ve katkılı (%10 mFDM) zemin üzerinde yapıldığı için, sıcaklık ölçümleri de sadece 2 zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Model deneylerin çap ve yüksekliği (30 cm x 30 cm), serbest basınç deney numunelerine (3,5 cm x 7 cm) göre çok daha büyük olduğundan; sıcaklık ölçümleri, tam orta noktadan ve kenara yakın bir noktadan olmak üzere iki farklı noktada yapılmıştır. Böylece, yan yüzeye yakın olan noktalarda sıcaklık değişimi de gözlemlenerek noktalar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Derinlik olarak plexiglassın yüksekliğinin tam ortasından (14 cm derinlik) olacak şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir. P0 ve P10 zemin için ve kenar noktalardan yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları Şekil 7.13a ve Şekil 7.13b’de sunulmuştur.



(a) P0 zemin, (b) P10 zemin

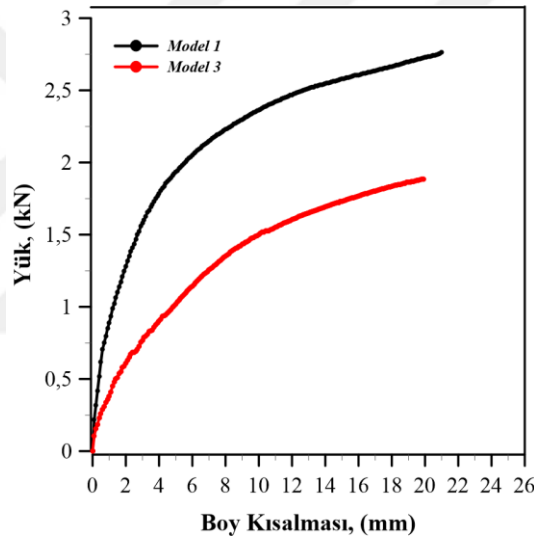
Şekil 7.13 Sıcaklık ölçüm sonuçları-model deneyler

Şekil 7.13a’da verilen P0 zemin üzerinde yapılan sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre, kenar noktadan yapılan sıcaklık ölçümlerinin hedeflenen donma ve çözülme sınır sıcaklık değerlerine (-20 C° ve $+20\text{ C}^\circ$) daha yakın olduğu görülmüştür. Her iki noktada yapılan ölçümler başlangıçta birbirine yakın değer göstermiş olsa da, donma hedef sıcaklığına (-20 C°) kenar nokta daha yaklaşmıştır. Kenar nokta -18 C° ’yi görürken, orta nokta -14 C° ’ye ulaşabilmiştir. Benzer şekilde çözülme aşamasındaki hedef sıcaklık olan $+20\text{ C}^\circ$ ’ye kenar nokta 16 C° ile orta nokta 12 C° ile ulaşmıştır.

Şekil 7.13b’de verilen P10 zemin üzerinde yapılan sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre, kenar noktadan yapılan sıcaklık ölçümlerinin hedeflenen donma ve çözülme sınır

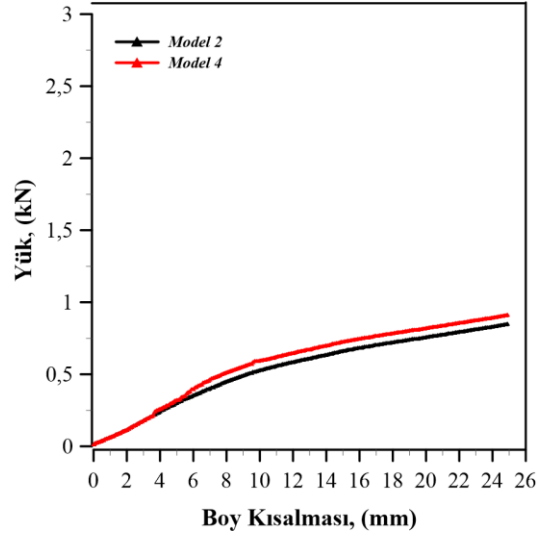
sıcaklık değerlerine ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) daha yakın olduğu görülmüştür. Her iki noktada yapılan ölçümler başlangıçta birbirine yakın değer göstermiş olsa da, donma hedef sıcaklığına ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) kenar nokta daha yaklaşmıştır. Kenar nokta $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi görürken, orta nokta $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşabilmiştir. Benzer şekilde çözülme aşamasındaki hedef sıcaklık olan $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kenar nokta $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile orta nokta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile ulaşmıştır. Thermocouple ölçümlerinin yanı sıra, numunelerin kabinde beklediği sıcaklık ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve sürede (24 saat) yeteri kadar donduğu el yordamıyla, yeteri kadar çözüldüğü de gözle kontrol edilmiştir.

Tablo 7.1'de verilen 4 model için yapılan yükleme deneyleri ile elde edilen yük- (şekil değiştirme) penetrasyon (cm) ilişkisi Model 1 ve Model 3 için Şekil 7.14'te, Model 2 ve Model 4 için Şekil 7.15'de sunulmuştur.



Şekil 7.14 Model 1 ve Model 3 için yük-boy kısalması ilişkisi

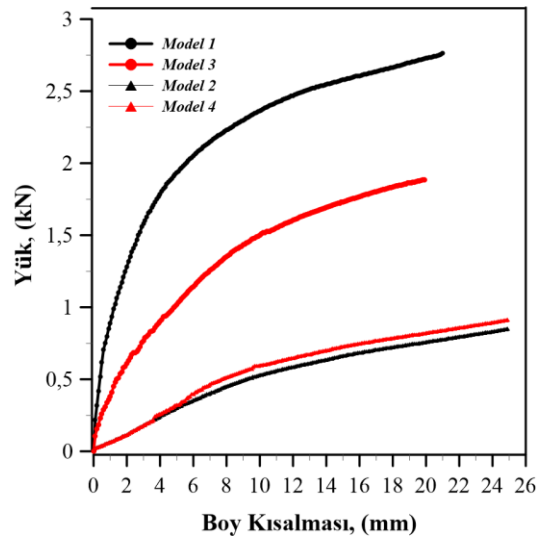
Şekil 7.14'te görüldüğü üzere P0 zeminin herhangi bir donma çözülme çevrimine maruz kalmaması durumunda (Model 1) daha büyük yükler altında daha düşük oturma gösterdiği, daha mukavemetli olduğu, 11 donma çözülme çevrimine maruz kalmasının ardından (Model 3) ise daha düşük yüklere dayanıklılık gösterdiği belirlenmiştir. Model 1'de 2 cm'de elde edilen yük değeri, Model 3'te aynı oturma değerinde elde edilen yük değerinin yaklaşık 1,5 katıdır. Model 1 ve Model 3 için yük-deformasyon eğrilerinin eğimi birbirine oldukça yakındır. Bu durum, serbest basınç deneylerinde de gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrimlerinin artması ile zeminin mukavemetini ciddi oranda kaybettiği ve donma çözülme koşullarına maruz kalması durumları için iyileştirme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.15 Model 2 ve Model 4 için yük-boy kısalması ilişkisi

Şekil 7.15'te görüldüğü üzere P10 zeminin herhangi bir donma çözülme çevrimine maruz kalması durumunda (Model 4) daha büyük yükler altında daha düşük oturma gösterdiği, daha mukavemetli olduğu, donma çözülme çevrimine maruz kalmaması durumunda (Model 2) ise daha biraz düşük yüklere dayanıklılık gösterdiği belirlenmiştir. Model 4'te 2 cm'de elde edilen yük değeri ile Model 2'de aynı oturma değerinde elde edilen yük değeri ve yük-deformasyon eğrilerinin eğimi birbirine oldukça yakındır. Bu da mFDM'nin donma çözülme çevrimleri boyunca zeminin davranışını sabit tutabildiğini kanıtlamaktadır.

P0 ve P10 zemin üzerinde yapılan 4 model deney sonucu bir arada olacak şekilde Şekil 7.16'da sunulmuştur.



Şekil 7.16 Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 için yük-boy kısalması ilişkisi

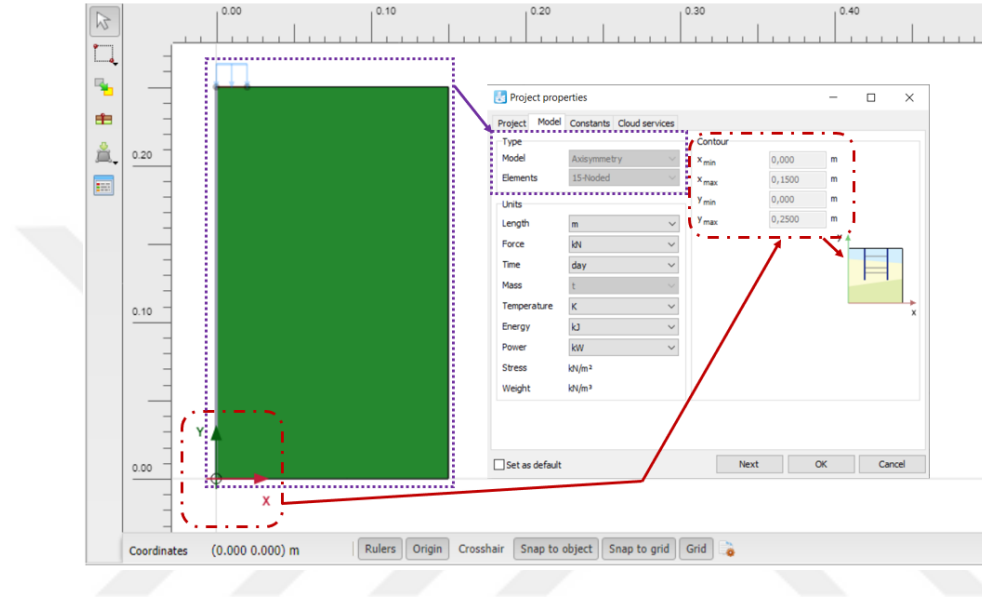
Şekil 7.16’da tüm model deney sonuçları bir arada verilmiştir. P0-0 zemini temsil eden Model 1, tüm modeller içinde en iyi performans gösterirken, P0-11 zemini temsil eden Model 3, Model 1’e göre daha düşük bir mukavemet davranışı sergilemiştir. Bu beklenen bir durumdur. Donma çözülme çevrimlerinin zeminin mukavemetinde %74’e kadar varan bir kayıp meydana getirdiği Bölüm 3’te sunulan serbest basınç deney sonuçlarında da görülmüştür.

Yapılan serbest basınç, tek boyutlu ödometre deneylerinde mFDM katkısı ile zeminin iyileştirilebileceği önerilmiş, bu maksatla %10 mFDM katkılı zemin için de model deneyler aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. P10-0 zemini temsil eden Model 2, Model 1 ve Model 3’e göre çok daha düşük bir mukavemet davranışı göstermiştir. Bu da beklenen bir durumdur. mFDM katkısının zeminin başlangıç mukavemetini düşürdüğü de yapılan serbest basınç deneylerinde görülmüştür. Ancak, mFDM katkısı zeminin başlangıç mukavemetini düşürmüş olsa da, donma çözülme çevrimleri boyunca mukavemeti sabit tuttuğu, bu sebeple mFDM katkısının iyileştirmede kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. P10-11 zemini temsil eden Model 4, Model 2’ye göre biraz daha iyi performans göstermiştir. Bu durum, donma çözülme çevrimleri boyunca zeminin mukavemetinin iyileştirilebildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, yapılan model deneyler ile mFDM’nin katkısız zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalması durumları için kullanılabileceğini bir kez daha kanıtlamıştır.

Tamamlanan model deneylerin ve sıcaklık ölçümlerinin akabinde, laboratuvar modellerinden elde edilen zemin davranışı baz alınarak, Plaxis2D yazılımında sayısal analiz modelleri kurulmuş ve yük-deformasyon davranışı küçük ölçekli deney model verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, yapılan sayısal analizler Şekil 7.6’da sunulan ölçekli modellerle kalibre edilmiş ve donma çözülme çevrimine maruz kalan/kalmayan zeminlerin incelenmesi için yapılacak sayısal analizlerde kullanılmak üzere gerekli girdi parametreleri elde edilmiştir.

7.2 Model 1 ve Model 2'nin Plaxis2D Yazılımında Sayısal Modellemesi

Şekil 7.2'de model sınır koşulları, Şekil 7.4'te malzeme hazırlanma adımları ve Şekil 7.6'da yükleme adımları sunulan küçük ölçekli deney modellerinin (4 model de) Plaxis2D yazılımına kurulum aşamaları, Şekil 7.17'de adımlar halinde sunulmuştur.

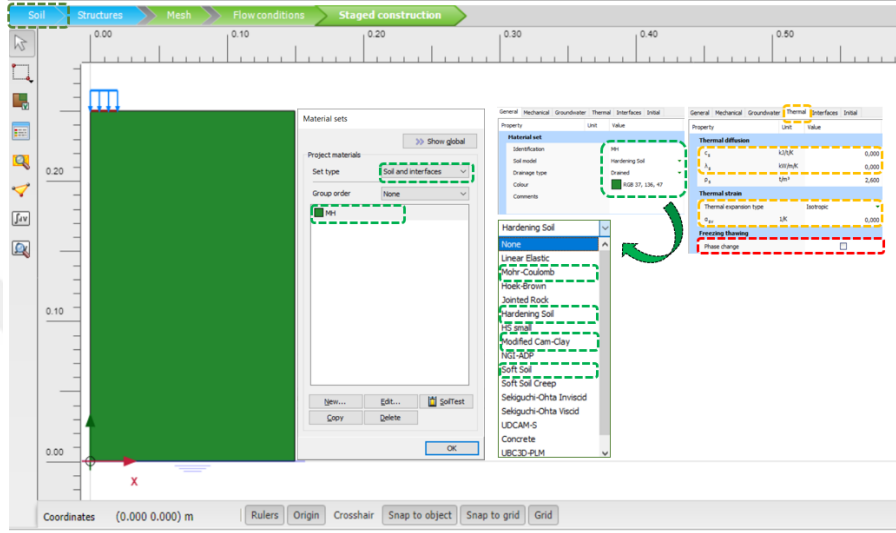


Şekil 7.17 Plaxis2D model tipi ve sınırları

Sayısal analiz modelinde model, eksenel simetri olarak tanımlanmıştır. Şekil 7.1'de ölçüleri sunulan plexiglass hücre (30 cm x 30 cm) ve yükleme ağırlığı (42 mm x 55 m) ölçüleri göz önünde bulundurularak, x ve y koordinatları ve mesafeleri belirlenmiştir. x mesafesi için plexiglass hücrenin çapının yarısı ($30 \text{ cm}/2=15 \text{ cm}=0,15 \text{ m}$) alınırken, y mesafesi için plexiglass hücre içerisine sıkıştırılan zeminin yüksekliği (25 cm) baz alınmıştır.

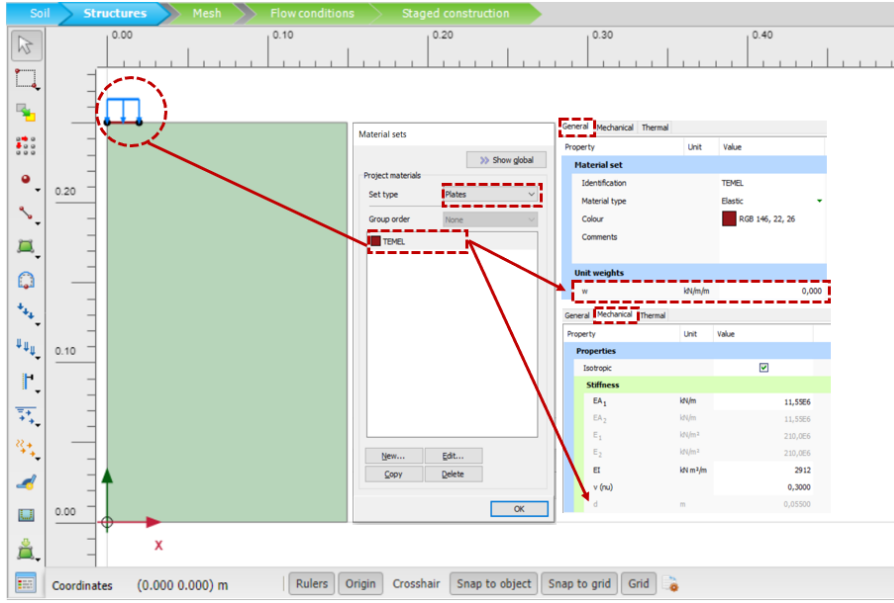
Tablo 7.1'de de sunulduğu üzere küçük ölçekli model deneyler, P0-0, P0-11, P10-0 ve P10-11 zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, model tipi ve sınırlarının belirlenmesinin akabinde çalışmada kullanılan P0 ve P10 zemin Plaxis2D yazılımına tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, MH zemin üzerinde gerçekleştirilen ve önceki bölümlerde detaylı bir biçimde sunulan sınıflandırma, kompaksiyon, tek boyutlu ödometre ve düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları dikkate alınmıştır. Katkısız (P0) ve katkılı (P10) zemin üzerinde gerçekleştirilen ve Şekil 2.3, Tablo 2.1, Şekil 2.30'da sunulan sınıflandırma deney sonuçları, Şekil

2.33 ve Tablo 2.14’te sunulan kompaksiyon deney sonuçları, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sunulan tek boyutlu ödometre deney sonuçları ve Tablo 4.4 ve Şekil 4.37’de sunulan düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları dikkate alınarak zemin parametreleri girilmiştir. Bahsi geçen deney verilerinden, her iki zemin için de donma çözülme çevrimlerinin yapılmadığı koşullar (P0-0, P10-0) göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 7.18).



Şekil 7.18 Plaxis2D zemin özellikleri ve malzeme modelleri-Model 1 ve Model 2

Şekil 7.18’de drenaj tipinin “drained” olarak seçilmesinin sebebi su seviyesinin olmaması, dolayısıyla yükleme esnasında boşluk suyu basıncının gelişmemesidir. Şekil 7.18’de de sunulduğu üzere Model 1 ve Model 2 için malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS), Modified Cam-Clay (CC), Soft Soil (SS) modelleri kullanılmıştır. Model 1 ve Model 2, katkılı ve katkısız zeminin çevrimsiz koşullardaki davranışını temsil ettiğinden “thermal” sekmesinde herhangi bir malzeme parametresi girilmemiştir. Böylece, zemin tanımlaması tamamlanmıştır. Model tipi, sınırları ve zemin özelliklerinin tanımlanmasının akabinde 42 mm x 55 mm boyutlarında olan yükleme ağırlığı için de tanımlamalar yapılmıştır (Şekil 7.19).



Şekil 7.19 Plaxis2D temel-plaka özellikleri

Şekil 7.19’da ağırlık kısmında “0 kN/m/m” alınmasının sebebi, Şekil 7.6’da da sunulduğu gibi yükleme çubuğu ile yükleme ağırlığının birlikte çalışıyor olmasıdır. “Ağırlıksız zemin/temel koşulu” dur. Bunun yanı sıra, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15’te P0 ve P10 zemin için elde edilen maksimum yük (kN) değeri, yayılı yüke (kN/m²) çevrilerek etkilmiştir.

İlgili girdiler Plaxis2D yazılımına işlenerek, “Model 1 (P0-0) ve Model 2 (P10-0)” küçük ölçekli model deneylerden elde edilen ve Şekil 7.14 ile Şekil 7.15’te sunulan eğrilere en yakın eğriyi veren malzeme modeli ve malzeme parametreleri tespit edilmiştir.

Küçük ölçekli deney model eğrisine en yakın eğriyi verecek olan **Plaxis 2D’ye tanımlanan Model 1 için;** Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS), Soft Soil (SS), Cam-Clay (CC) malzeme modelleri seçilerek analizler yapılmıştır. Mohr-Coulomb (MC) ve Hardening Soil (HS), Soft Soil (SS) malzeme modellerinde kullanılan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ°) ve elastisite modülü (E) değerleri gibi malzeme parametreleri seçiminde literatür göz önünde bulundurulmuştur. Budhu vd. (2010) ve Bowles vd. (1997)’nin önerdiği tipik parametre değerleri ile Phoon vd. (1995)’in önerdiği COV (%) değerlerinden yararlanılmıştır (Tablo 7.2, Tablo 7.3 ve Tablo 7.4). Aynı zamanda Soft Soil (SS) ve Cam-Clay (CC) malzeme modellerinde kullanılan Cc, Cs, λ , κ , e değerleri yapılan tek boyutlu ödometre deneylerinden elde edilmiştir (Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).

Tablo 7.2 Parametre (ν ve E) seçimi (Budhu vd. (2010) ve Bowles vd. (1997))

<i>Zemin Türü</i>	<i>Bowles vd. (1997)</i>	<i>Budhu vd., (2010)</i>	
	<i>E (MPa)</i>	ν	<i>E (mPa)</i>
Çok Yumuşak kil	2-15	-	-
Yumuşak kil	5-25	0.35-0.40	1-15
Orta katı kil	15-50	0.30-0.35	15-30
Katı-sert kil	50-100	0.20-0.30	30-100
Gevşek kum	10-25	0.15-0.25	10-20
Orta sıkı kum	-	0.25-0.30	20-40
Sıkı kum	50-51	0.25-0.35	40-80

Tablo 7.3 Parametre (ϕ') seçimi (Budhu vd. (2010))

<i>Zemin Türü</i>	$\phi'(^{\circ})$
Çakıl	30-50
İnce dane içeren çakıl/kum	28-40
Temiz kum	27-50
Silt / Siltli kum	24-35
Kil	15-30

Tablo 7.4 Parametre güvenirliliği (Phoon vd. (1995))

<i>Parametre</i>	<i>Zemin Türü</i>	<i>COV (%)</i>
S_u	Kil	30-55
ϕ'	Kil	7-20
ϕ'	Kum	10-15
E_{PMT}	Kil	80-95
E_{PMT}	Kum	15-70
E_D	Silt	35-55
E_D	Kum	10-70

Malzeme parametresinin seçimi ve seçilen değerlere COV (%) uygulanması, örnek temsil etmesi açısından Model 1 (P0-0) için aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

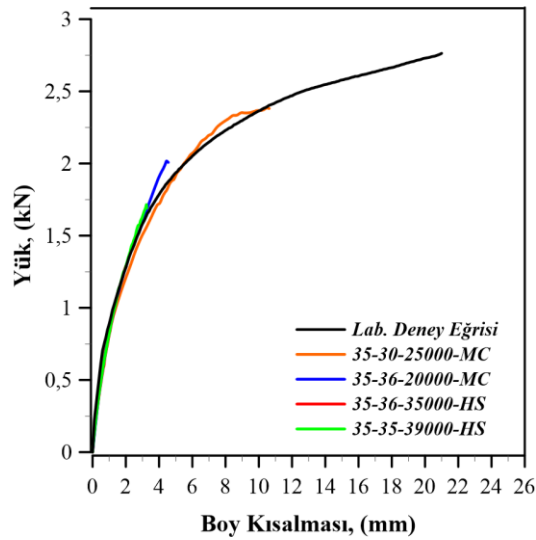
P0-0, optimum su muhtevası %35,00 ve likit limit değeri %54,00 olan orta katıllıkta bir zemindir. Tablo 7.2 ve Tablo 7.3'te yer alan;

- Elastisite modülü (mPa) değeri için; yumuşak kil ve orta katı kil zemin sınıfında yer alan zeminler için önerilen 1-15 mPa ile 15-30 mPa,
- İçsel sürtünme açısı ($^{\circ}$) değeri için; silt/siltli kum/kil zemin sınıfında yer alan zeminler için önerilen 24-35($^{\circ}$) ile 15-30($^{\circ}$)
- Kohezyon (su) değeri için; ise 25 kPa değeri seçilmiştir. COV (%) değerleri ise Tablo 7.4'ten elastisite modülü değeri için %30, içsel sürtünme açısı değeri için %20, kohezyon değeri için ise %40 olarak uygulanmıştır.

İlgili malzeme parametreleri (c , ϕ ve E) ve malzeme modelleri (MC, HS, CC ve SS) baz alınarak Model 1 için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda, küçük ölçekli laboratuvar deney eğrilerine en yakın eğriyi veren malzeme modelleri ve malzeme parametreleri belirlenmiş ve Tablo 7.5 ile Şekil 7.20'de sunulmuştur.

Tablo 7.5 Model 1 için malzeme parametreleri

<i>Malzeme Modeli</i>	<i>E (kN/m²)</i>	<i>c (kPa)</i>	<i>ϕ (°)</i>
MC	20000	35	36
MC	25000	35	30
HS	39000	35	35
HS	35000	35	36



Şekil 7.20 Model 1 için malzeme parametreleri

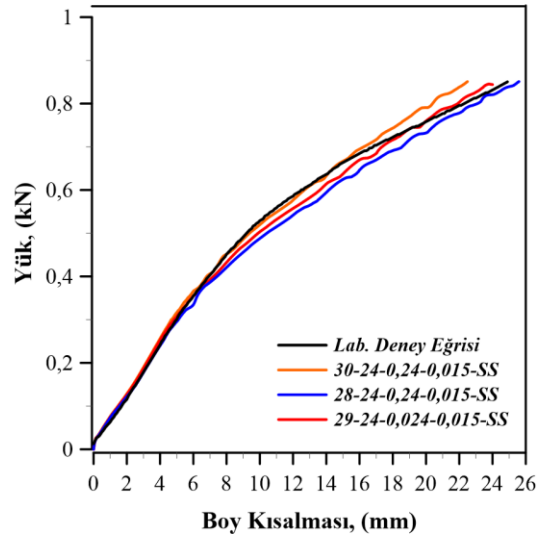
Şekil 7.20’de yer alan eğrilerin isimlendirilmesinde ilk terim kohezyonu, ikinci terim içsel sürtünme açısını, üçüncü terim elastisite modülünü, dördüncü terim ise malzeme modelini ifade etmektedir. Buna göre “35-30-25000-MC”; 35 kPa kohezyon, 30° içsel sürtünme açısı, 25000 kN/m² elastisite modülü ve Mohr Coulomb (MC) malzeme modelindeki analiz sonucunu temsil etmektedir.

Şekil 7.20’de de görüldüğü üzere, Model 1 için yapılan analizlerde malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb (MC) ve Hardening Soil (HS)’in daha uygun olduğu belirlenmiştir. Tablo 7.5 ve Şekil 7.20 birlikte değerlendirildiğinde, Model 1 için en uygun eğrinin **“35-30-25000-MC”** olduğu görülmektedir. HS malzeme modelinde elde edilen eğrilerin gerek daha büyük boy kısalması değerlerine ulaşamaması gerek malzeme parametre değerlerinin büyük değerlerde olması, HS malzeme modelinin seçilmesini mümkün kılmamaktadır. Model 1 için, SS ve CC malzeme modelleri kullanılarak uygun eğriler elde edilememiştir.

Model 1 için; en uygun eğrinin, malzeme modelinin ve malzeme parametrelerinin belirlenmesinin hemen ardından, Model 2 için de benzer adımlar izlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda, küçük ölçekli laboratuvar deney eğrilerine en yakın eğriyi veren malzeme modelleri ve malzeme parametreleri belirlenmiş ve Tablo 7.6 ile Şekil 7.21’de sunulmuştur.

Tablo 7.6 Model 2 için malzeme parametreleri

<i>Malzeme Modeli</i>	<i>c (kPa)</i>	<i>ϕ (°)</i>	<i>λ</i>	<i>κ</i>
SS	30	24	0,24	0,015
SS	29	24	0,24	0,015
SS	28	24	0,24	0,015



Şekil 7.21 Model 2 için malzeme parametreleri

Şekil 7.21’de yer alan eğrilerin isimlendirilmesinde ilk terim kohezyonu, ikinci terim içsel sürtünme açısını, üçüncü terim lamda’yı (λ), dördüncü terim kapa’yı (κ), beşinci terim ise malzeme modelini ifade etmektedir. Buna göre “30-24-0,24-0,015-SS”; 30 kPa kohezyon, 24° içsel sürtünme açısı, 0,24 lamda, 0,015 kapa ve Soft Soil (SS) malzeme modelindeki analiz sonucunu temsil etmektedir.

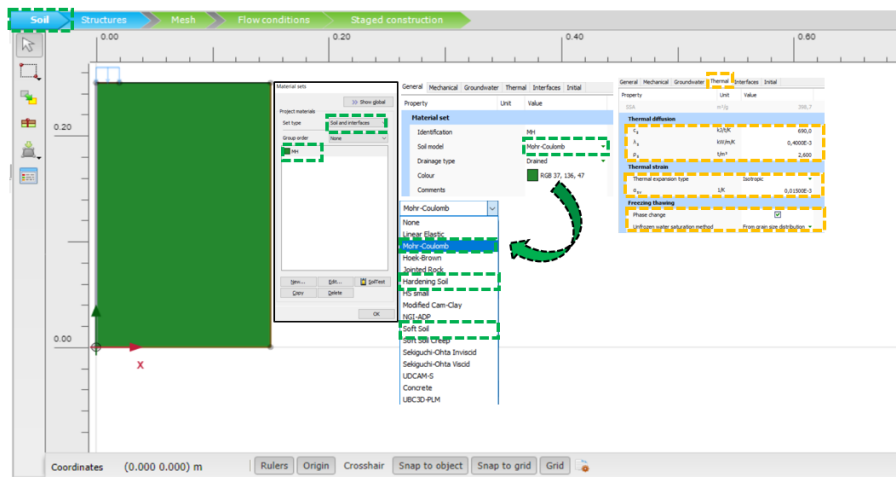
Şekil 7.21’de de görüldüğü üzere, Model 2 için yapılan analizlerde malzeme modeli olarak Soft Soil (SS)’in daha uygun olduğu belirlenmiştir. Tablo 7.6 ve Şekil 7.21 birlikte değerlendirildiğinde, Model 2 için en uygun eğrinin **“30-24-0,24-0,015”** olduğu görülmektedir. Model 2 için, MC ve HS malzeme modelleri kullanılarak uygun eğriler elde edilememiştir.

Tablo 7.1’de de sunulduğu üzere Model 1 ve Model 2 katkılı ve katkısız zeminin donma çözülme çevrimlerine maruz kalmaması durumları için yapılmış deneylerdir. Model 3 (P0-11) ve Model 4 (P10-11) ise aynı katkı oranındaki zeminlerin 11 çevrime maruz kalması durumlarını temsil eden model deneylerdir. Model 1 ve Model 2 için Şekil 7.18’deki gibi zemin parametreleri tanımlanırken Model 3 ve Model 4 için aynı sekme içerisinde yer alan “thermal” kısım önem arz etmektedir.

7.3 Model 3 ve Model 4'ün Plaxis2D Yazılımında Sayısal Modellemesi

Şekil 7.2'de model sınır koşulları, Şekil 7.4'te malzeme hazırlanma adımları ve Şekil 7.6'da yükleme adımları sunulan küçük ölçekli deney modellerinin (4 model de) Plaxis2D yazılımına kurulum aşamaları, Şekil 7.17'de adımlar halinde sunulmuştur.

Tablo 7.1'de de sunulduğu üzere küçük ölçekli model deneyler, P0-0, P0-11, P10-0 ve P10-11 zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, model tipi ve sınırlarının belirlenmesinin akabinde çalışmada kullanılan P0 ve P10 zemin Plaxis2D yazılımına tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, MH zemin üzerinde gerçekleştirilen ve önceki bölümlerde detaylı bir biçimde sunulan sınıflandırma, kompaksiyon, tek boyutlu ödometre ve düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları dikkate alınmıştır. Katkısız (P0) ve katkılı (P10) zemin üzerinde gerçekleştirilen ve Şekil 2.3, Tablo 2.1, Şekil 2.30'da sunulan sınıflandırma deney sonuçları, Şekil 2.33 ve Tablo 2.14'te sunulan kompaksiyon deney sonuçları, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulan tek boyutlu ödometre deney sonuçları ve Tablo 4.4 ve Şekil 4.37'de sunulan düşen seviyeli permeabilite deney sonuçları dikkate alınarak zemin parametreleri girilmiştir. Bahsi geçen deney verilerinden, her iki zemin için de donma çözülme çevrimlerinin yapıldığı koşullar (P0-11, P10-11) göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 7.22).

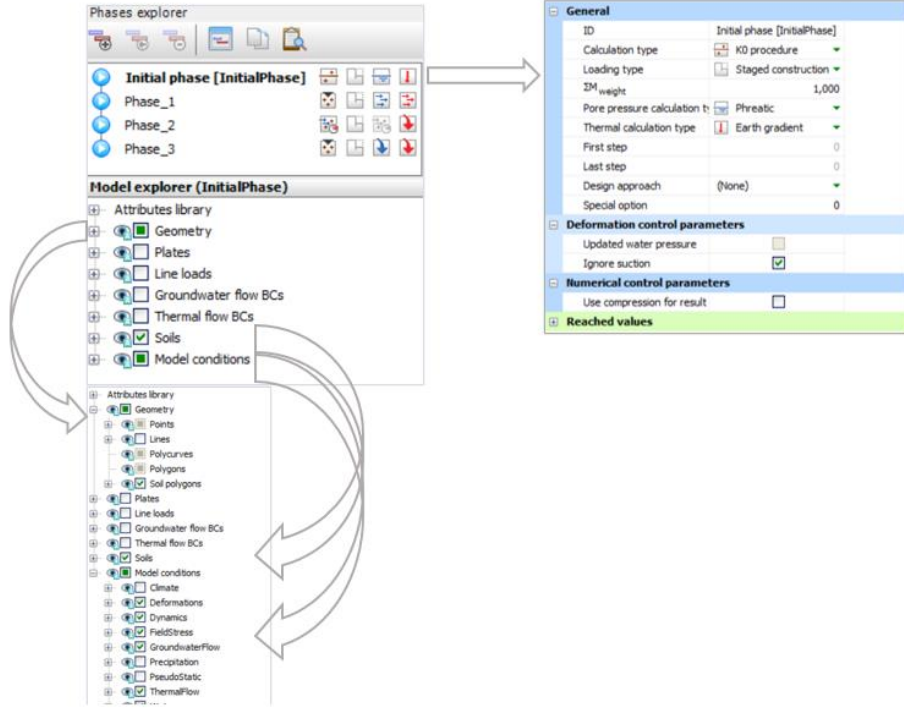


Şekil 7.22 Plaxis2D zemin özellikleri ve malzeme modelleri-Model 3 ve Model 4

Şekil 7.22’de drenaj tipinin “drained” olarak seçilmesinin sebebi su seviyesinin olmaması, dolayısıyla yükleme esnasında boşluk suyu basıncının gelişmemesidir. Şekil 7.22’de de sunulduğu üzere Model 3 ve Model 4 için malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (HS) ve Soft Soil (SS) modelleri kullanılmıştır. Malzeme modeli seçiminde Model 1 ve Model 2 sonuçları göz önünde bulundurulmuştur. Model 1 ve Model 2, katkılı ve katkısız zeminin çevrimsiz koşullardaki davranışını temsil ettiğinden “thermal” sekmesinde herhangi bir malzeme parametresi girilmemiştir. Model 3 ve Model 4, katkılı ve katkısız zeminin çevrimli koşullardaki davranışını temsil ettiğinden “thermal” sekmesinde yer alan parametreler literatür desteği ile girilmiştir. Böylece, zemin tanımlanma aşaması tamamlanmıştır. Zemin parametrelerinin tanımlanmasının akabinde yük değerleri de 7.19’daki gibi girilmiştir.

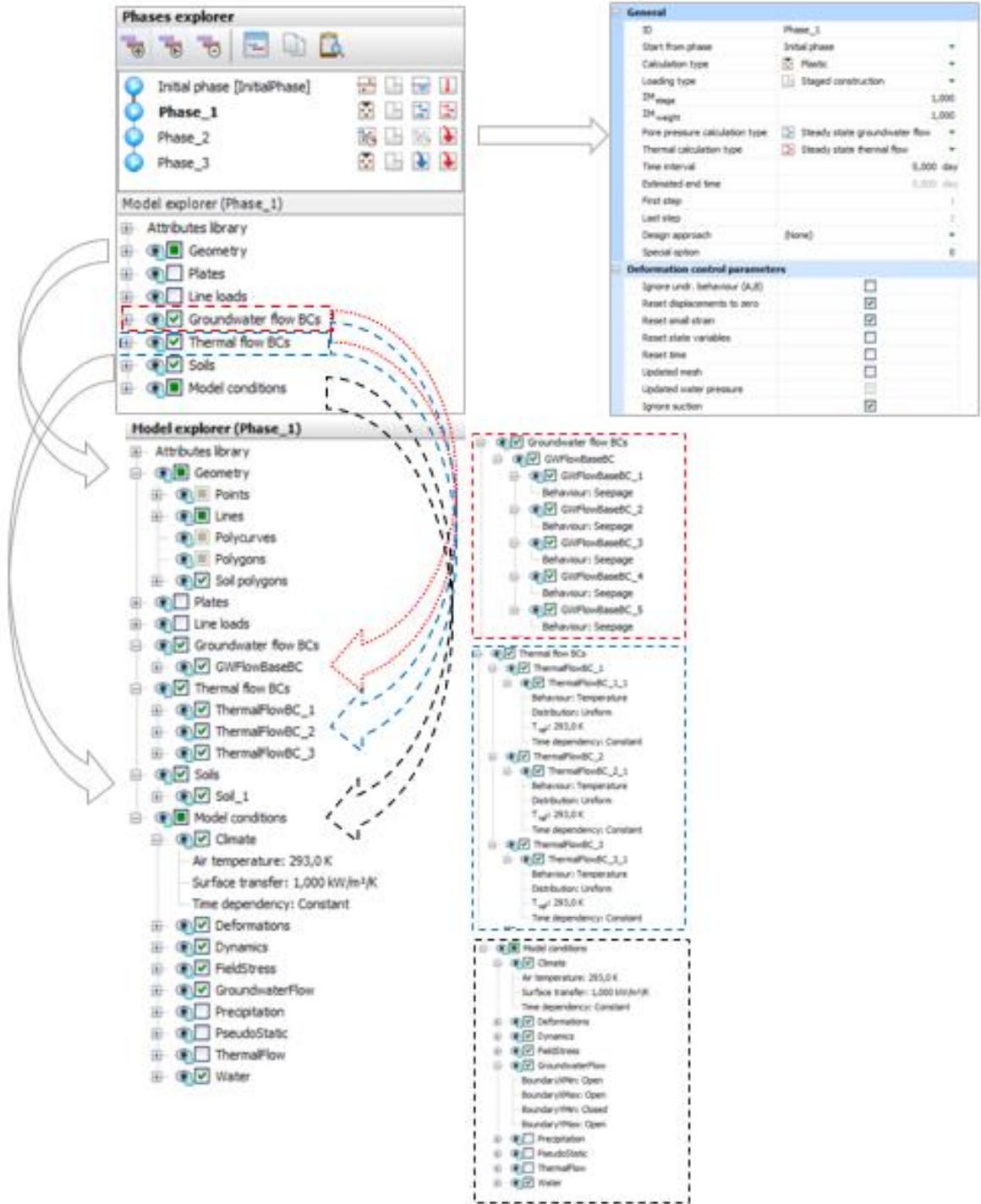
Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4, aynı şekilde Plaxis2D yazılımına kurulmuş, en önemli fark donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin “thermal” sekmesinde yer alan bilgilerinin girilmesidir. Bunun dışında, model kurulumları aynıdır. Ancak, Model 1 ve Model 2’de sadece “Initial phase ve Phase 1” adımları ile analizler tamamlanırken, Model 3 ve Model 4’te “Initial phase, Phase 1, Phase 2, Phase 3” adımları ile analizler nihai sonuca ulaşmıştır. Model 1 ve Model 2’de donma çözülme çevrimleri olmaması sebebi ile “Initial phase” adımı model sınırları tanımlanmış, “Phase 1” adımı ise direkt olarak zemin üzerine yük verilerek yük-deformasyon davranışı incelenmiştir. Model 3 ve Model 4’te ise donma çözülme çevrimlerinin olması sebebi ile “Initial phase” adımı model sınırları tanımlanmış, “Phase 1” adımı donma çözülme çevrimleri için sınır şartları (thermal flow BCs.) oluşturulmuş, “Phase 2” adımı donma çözülme çevrimleri için sıcaklık değerleri ve zaman fonksiyonu tanımlanmış, ardından donma çözülme çevrimleri uygulanmış, “Phase 3” adımı ise donma çözülme çevrimleri tamamlanan zemin üzerine yük verilerek yük-deformasyon davranışı incelenmiştir.

Model 1 ve Model 2’de olduğu gibi Model 3 ve Model 4’ün Plaxis2D yazılımına kurulumları birebir aynıdır. Her iki model için de “Initial phase” adımı Şekil 7.23’teki adımlar izlenmiştir.



Şekil 7.23 Model 3 ve Model 4 için Initial phase

Her iki model için de “Phase 1” adımı Şekil 7.24’teki adımlar izlenmiştir.



Şekil 7.24 Model 3 ve Model 4 için Phase 1

Her iki model için de “Phase 2” adımımda Şekil 7.25’teki adımlar izlenmiştir.

The image displays the Phase 2 setup in a software interface, showing the Phases explorer, Model explorer, and various parameter settings.

Phases explorer: Shows the sequence of phases: Initial phase [InitialPhase], Phase_1, Phase_2 (selected), and Phase_3.

Model explorer (Phase_2): Lists the model components: Attributes library, Geometry, Plates, Line loads, Groundwater flow BCs, Thermal flow BCs (selected), Soils, and Model conditions (selected).

ThermalFlowBC_1_1: Details the thermal boundary condition settings:

- Behaviour: Temperature
- Distribution: Uniform
- T_{ref} : 293,0 K
- Time dependency: Time dependent
- Temperature function: TemperatureFunction_2

TemperatureFunction_2: Shows the signal settings and a graph:

- Name: TemperatureFunction_2
- Signal: Harmonic
- Amplitude: -40,00 K
- Phase: 0,000
- Period: 4,000 day
- Graph: A sinusoidal wave showing temperature variation over time (0 to 8 days).

General parameters:

Name	Value
ID	Phase_2
Start from phase	Phase_1
Calculation type	Fully coupled flow-deformation
Loading type	Staged construction
IM weight	1,000
Thermal calculation type	Use temperatures from previous pl
Time interval	2,000 day
Estimated end time	2,000 day
First step	3
Last step	24
Design approach	(None)
Special option	0

Deformation control parameters:

Name	Value
Force fully drained behaviour ne	☒
Reset displacements to zero	☒
Reset small strain	☒
Reset state variables	☐
Reset time	☐
Ignore suction	☐

Numerical control parameters:

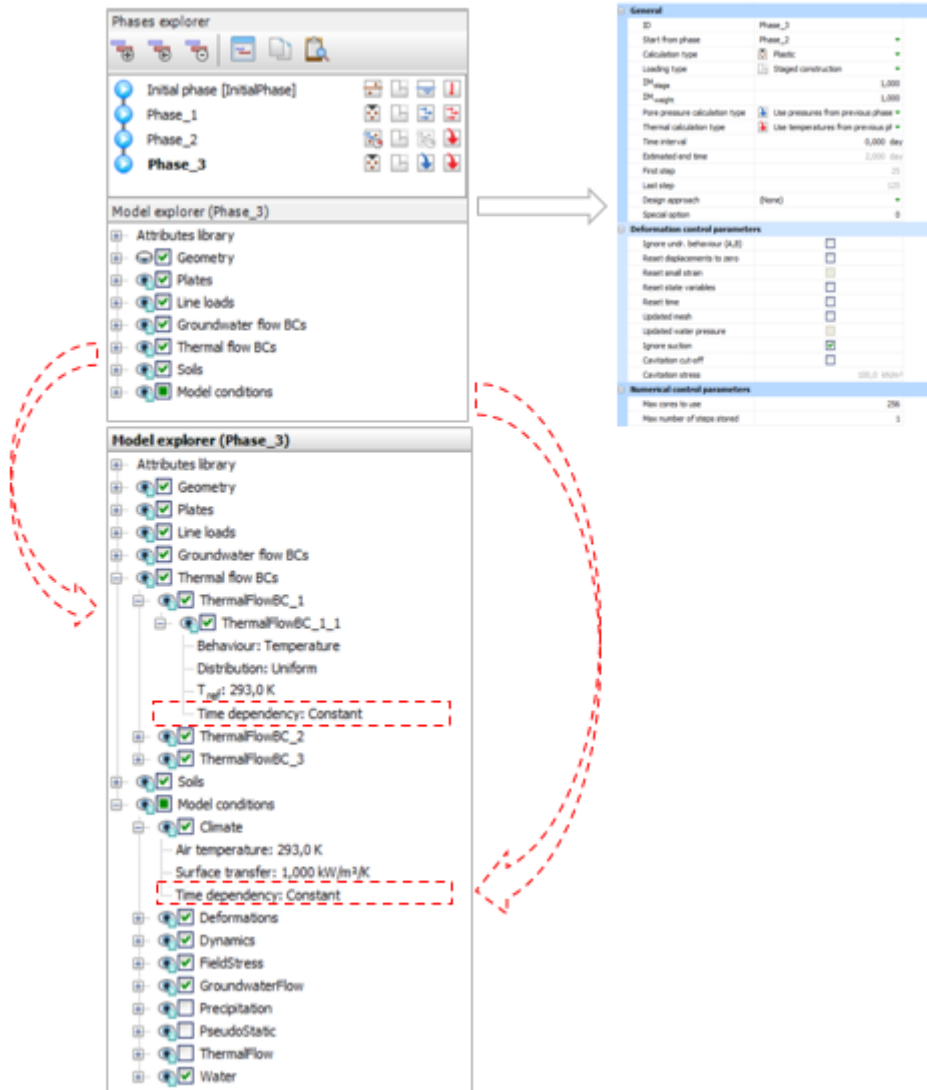
Name	Value
Max cores to use	256
Max number of steps stored	22

Model conditions:

- Climate
 - Air temperature: 293,0 K
 - Surface transfer: 1,000 kW/m²/K
 - Time dependency: Time dependent
- Temperature function: TemperatureFunction_2
- Deformations ☒
- Dynamics ☒
- FieldStress ☒
- GroundwaterFlow ☒
- Precipitation ☐
- PseudoStatic ☐
- ThermalFlow ☐
- Water ☒

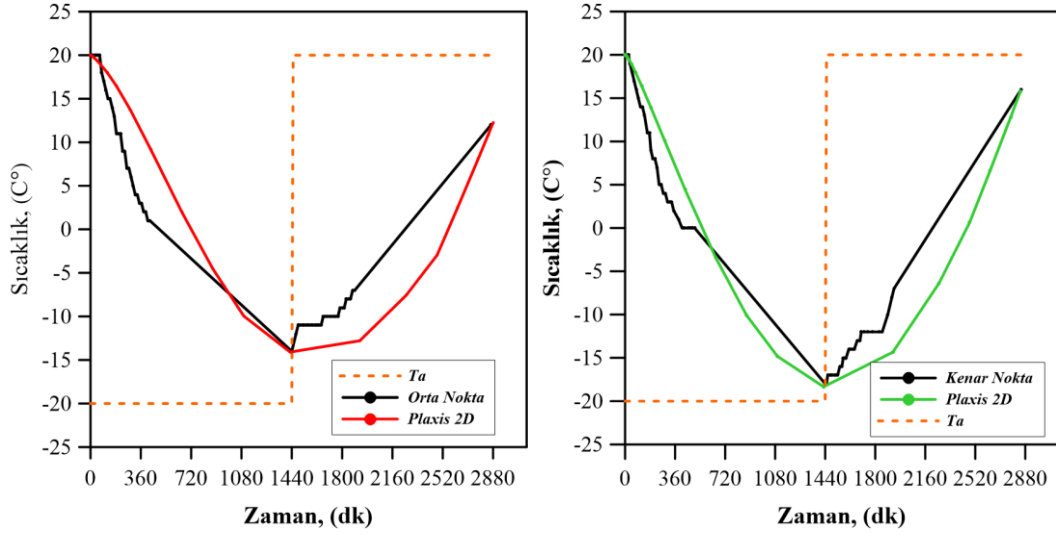
Şekil 7.25 Model 3 ve Model 4 için Phase 2

Her iki model için de “Phase 3” adımı Şekil 7.26’deki adımlar izlenmiştir.



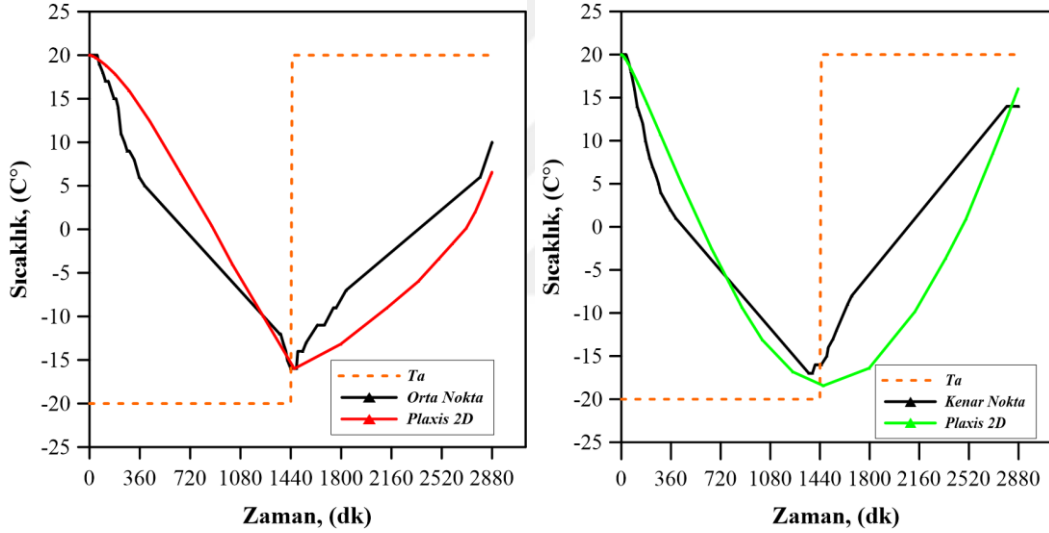
Şekil 7.26 Model 3 ve Model 4 için Phase 3

Şekil 7.23-Şekil 7.26’da sunulan adımlar dikkate alınarak Model 3 ve Model 4 için Plaxis2D kurulumu tamamlanmıştır. Donma çözülme çevrimleri analizleri süresince “Initial phase” ve “Phase 1” adımları hızlı bir biçimde tamamlanmaktadır. “Phase 2” adımı önceki adımlardan farklı olarak “thermal function” tanımlanmıştır. “Thermal function”, zeminin Şekil 7.18’de sunulan “thermal” parametreleri (c_s , λ_s , ρ_s , α_{sv}) ile ilgilidir. Şekil 7.13’te küçük ölçekli model deneyler üzerinde yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları, katkılı ve katkısız zeminin donma çözülme çevrim sıcaklıklarında tutulması süresince dış ortam sıcaklığına ulaşılıp ulaşılamadığını göstermektedir. Zeminin hedeflenen sıcaklık değerlerine ulaşabilmesi, zeminin ısı kapasitesi (c_s), ısı iletkenliği (λ_s), thermal difüzyonu (α_{sv}) ile alakalıdır. Bu durum Model 3 ve Model 4 için laboratuvar da ölçülmüş (Şekil 7.13a ve Şekil 7.13b), Plaxis2D’ye tanımlanan modeller üzerinde de “Phase 2” adımı tanımlanan “thermal function” ile karşılaştırılmıştır. Model 3 ve Model 4 için, “Phase 3” adımıdaki malzeme parametreleri (c , ϕ , E) seçilmeden önce, “Phase 2” adımı malzeme thermal özellikleri belirlenmiştir. Parametrelerin belirlenmesinde literatür verileri dikkate alınmıştır (Abu-Hamdeh, 2002; Bejan ve Kraus, 2003; Dehdezi ve Dawson, 2011; Duarte vd., 2006; Erişgen, 2022; Farouki, 1986; Ghuman ve Lal, 1985; Johansen, 1975; Mitchell, 1993; Van Wijk ve de Vries, 1963; Yadav ve Saxena, 1973; Zhang ve Michalowski, 2015; Zhang vd., 2018). Model 3 ve Model 4 için küçük ölçekli laboratuvar model deney sıcaklık ölçümleri ve Plaxis2D yazılımında elde edilen eğriler P0 zemin için orta noktadan yapılan ölçüm sonuçları Şekil 7.27a’da, kenar noktadan yapılan ölçüm sonuçları ise Şekil 7.27b’de, P10 zemin için orta noktadan yapılan ölçüm sonuçları Şekil 7.28a’da, kenar noktadan yapılan ölçüm sonuçları ise Şekil 7.28b’de sunulmuştur.



a) P0 orta nokta, b) P0 kenar nokta

Şekil 7.27 Model 3 için model ve Plaxis 2D sıcaklık ölçüm sonuçları



Şekil 7.28 Model 4 için model ve Plaxis 2D sıcaklık ölçüm sonuçları

Şekil 7.27a'daki, thermocouple kullanılarak P0 zeminin orta noktasında yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları ve Plaxis2D yazılımında zemin thermal parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla oluşturulan "thermal function" sonuçlarına göre, her iki ölçümde de hedeflenen -20 C° donma sıcaklığına -14 C° 'de, hedeflenen $+20\text{ C}^\circ$ çözülme sıcaklığına ise $+12\text{ C}^\circ$ 'de ulaşılmıştır. Şekil 7.27b'deki sonuçlara göre, her iki ölçümde de hedeflenen -20 C° donma sıcaklığına -18 C° 'de, hedeflenen $+20\text{ C}^\circ$ çözülme sıcaklığına ise $+16\text{ C}^\circ$ 'de ulaşılmıştır.

Şekil 7.28a'daki, thermocouple kullanılarak P10 zeminin orta noktasında yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları ve Plaxis2D yazılımında zemin thermal parametrelerinin

belirlenebilmesi amacıyla oluşturulan “thermal function” sonuçlarına göre, her iki ölçümde de hedeflenen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ donma sıcaklığına $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, hedeflenen $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ çözülme sıcaklığına ise $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ulaşılmıştır. Şekil 7.28b'deki sonuçlara göre, her iki ölçümde de hedeflenen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ donma sıcaklığına $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, hedeflenen $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ çözülme sıcaklığına ise $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ulaşılmıştır.

Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'de sunulan eğrilerde, donma çözülme çevrim sınır şartları için hedeflenen değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Bu durumun elde edilmesinde kullanılan zemin thermal parametreleri ise Tablo 7.7'de sunulmuştur.

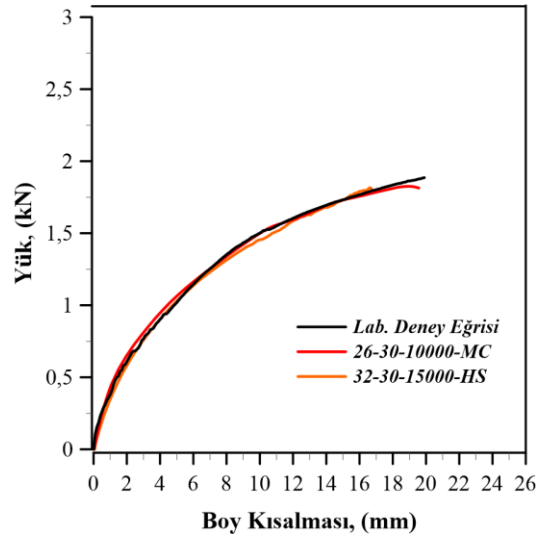
Tablo 7.7 Model 3 ve Model 4 için zemin thermal özellikleri

	<i>P0</i>	<i>P10</i>
c_s	880	1700
λ_s	0,4E-3	0,3E-3
α_{sv}	0,015E-3	0,025E-3
ρ_s	2,60	1,90

Şekil 7.27, Şekil 7.28 ve Tablo 7.7'deki verilerin elde edilmesinin ardından “Phase 3” adımına geçilmiş ve malzeme parametreleri (c (kPa) ve $\phi(^{\circ})$) belirlenmiştir. Bu kapsamda; Model 3 için Model 1, Model 4 için Model 2'de elde edilen malzeme parametreleri (c , ϕ ve E) ve malzeme modelleri (MC, HS, CC ve SS) baz alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Model 3 için yapılan analizler sonunda, küçük ölçekli laboratuvar deney eğrilerine en yakın eğriyi veren malzeme modelleri ve malzeme parametreleri belirlenmiş ve Tablo 7.8 ile Şekil 7.29'da sunulmuştur.

Tablo 7.8 Model 3 için malzeme parametreleri

<i>Malzeme Modeli</i>	<i>E (kN/m²)</i>	<i>c (kPa)</i>	<i>$\phi (^{\circ})$</i>
<i>MC</i>	10000	26	30
<i>HS</i>	15000	32	30



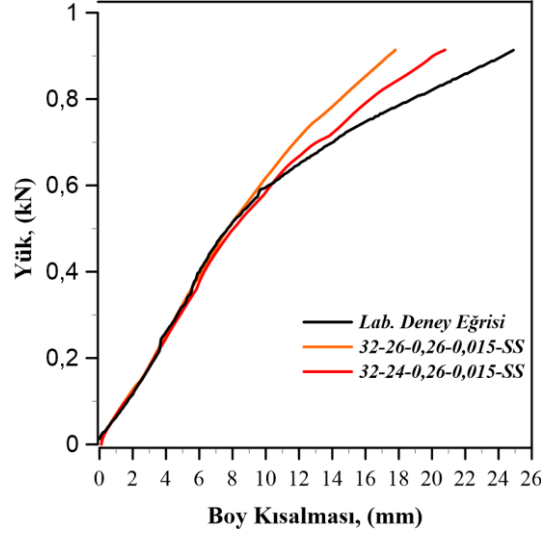
Şekil 7.29 Model 3 için malzeme parametreleri

Şekil 7.29’da da görüldüğü üzere, Model 3 için yapılan analizlerde malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb (MC) ve Hardening Soil (HS)’in daha uygun olduğu belirlenmiştir. Tablo 7.8 ve Şekil 7.29 birlikte değerlendirildiğinde, Model 3 için en uygun eğrilerin “32-30-15000-HS” ve “26-30-10000-MC” olduğu görülmektedir.

Model 3 için; en uygun eğrinin, malzeme modelinin ve malzeme parametrelerinin belirlenmesinin hemen ardından, Model 4 için de benzer adımlar izlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda, küçük ölçekli laboratuvar deney eğrilerine en yakın eğriyi veren malzeme modelleri ve malzeme parametreleri belirlenmiş ve Tablo 7.9 ile Şekil 7.30’da sunulmuştur.

Tablo 7.9 Model 4 için malzeme parametreleri

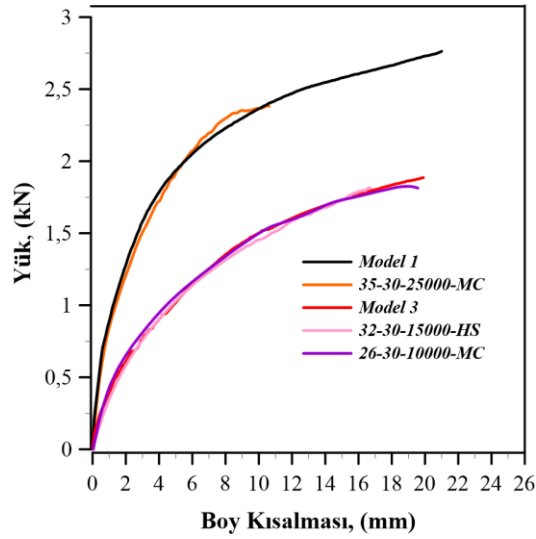
<i>Malzeme Modeli</i>	<i>c (kPa)</i>	<i>φ (°)</i>	<i>λ</i>	<i>κ</i>
SS	32	24	0,26	0,015
SS	32	26	0,24	0,015



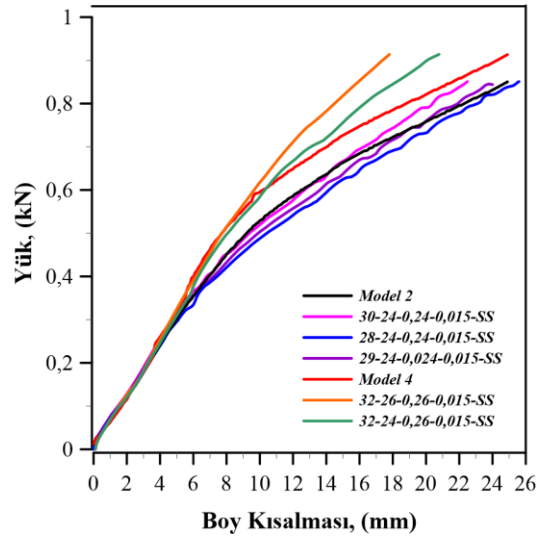
Şekil 7.30 Model 4 için malzeme parametreleri

Şekil 7.30’da da görüldüğü üzere, Model 4 için yapılan analizlerde malzeme modeli olarak Soft Soil (SS)’in daha uygun olduğu belirlenmiştir. Tablo 7.9 ve Şekil 7.30 birlikte değerlendirildiğinde, Model 4 için en uygun eğrilerin “32-26-0,26-0,015-SS” ve “32-24-0,26-0,015-SS” olduğu görülmektedir.

Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 üzerinde yapılan sayısal analizler sonucu, küçük ölçekli laboratuvar deney eğrisine en yakın eğrileri veren malzeme parametreleri sırasıyla Tablo 7.5, Tablo 7.6, Tablo 7.8 ve Tablo 7.9’da sunulmuştur. Elde edilen kalibrasyon ve laboratuvar eğrileri Model 1 (P0-0) ve Model 3 (P0-11) için bir arada olacak biçimde Şekil 7.31’de, Model 2 (P10-0) ve Model 4 (P0-11) için bir arada olacak biçimde Şekil 7.32’de sunulmuştur.



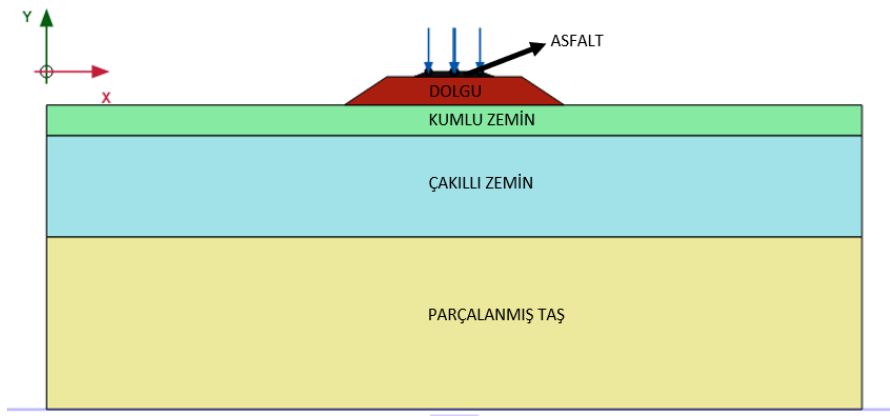
Şekil 7.31 Model 1 ve Model 3 sonuçlar



Şekil 7.32 Model 2 ve Model 4 sonuçlar

Böylece, yapılan sayısal analizler sonucunda, DÇ çevrimine maruz kalmış/kalmamış katkısız ve %10 mFDM katkılı yüksek plastisiteli killi siltli zeminlerin kayma direnci parametreleri, zemin bünye modelleri, zemin thermal parametreleri ve rijitlik parametreleri belirlenmiştir.

Yapılan sayısal analizler sonunda elde edilen veriler kullanılarak, Tablo 7.1’de yer alan 4 model (P0-0, P0-11, P10-0, P10-11) için, Plaxis2D’de bir yol dolgusu tasarlanmıştır (Şekil 7.33). Şekil 7.33’te sunulan yol dolgusu literatür desteği ile oluşturulmuştur (Mei vd., 2021).

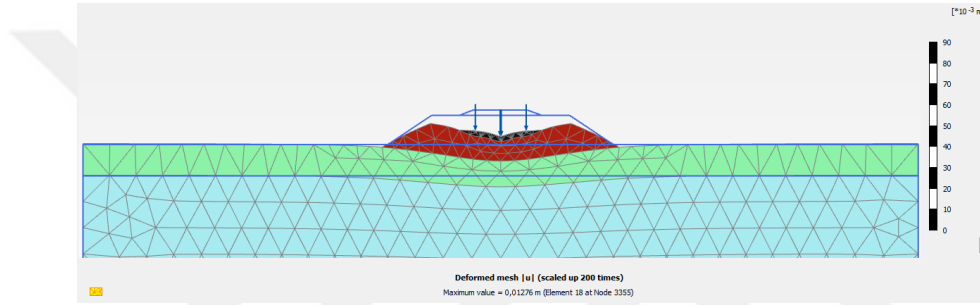


Şekil 7.33 Plaxis2D yol dolgusu kesiti (Mei vd. (2021))

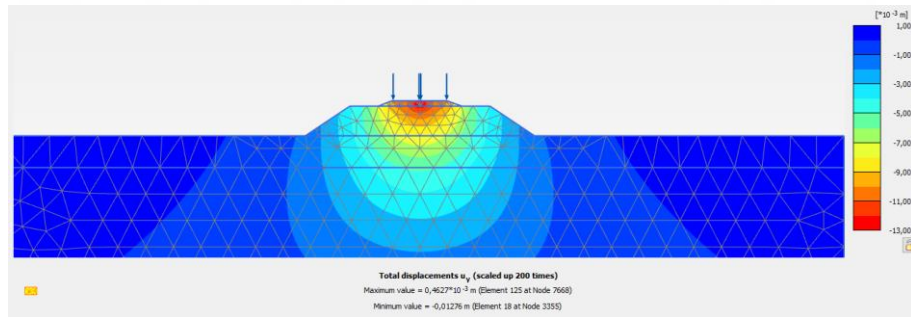
Tasarlanan yol dolgusu üzerinde katkı malzemesi ve DÇ çevrimlerinin etkileri gözlemlenmiştir. Böylece, sayısal analizlerden elde edilen parametreler ile bir yol dolgusunun sıcaklık altındaki oturma ve dayanım davranışı incelenmiştir.

Şekil 7.33'te sunulan yol dolgusu kesitinde yer alan zemin (katkılı ve katkısız) için malzeme parametreleri, Tablo 7.5-Tablo 7.9'da sunulmuştur. Zemin türleri (çakıllı, kumlu ve parçalanmış taş) ve asfalt tabakası için kullanılan termal ve malzeme özellikleri ise literatürden temin edilmiştir (Mei vd., 2021).

Tablo 7.5-Tablo 7.9'da sunulan ve literatürde verilen parametreler kullanılarak yapılan sayısal analizler sonunda, katkı malzemesinin kullanılması ile DÇ çevrimlerine maruz kalan bir yol dolgusunun davranışı belirlenmiştir. Model 1 (P0-0) için elde edilen analiz sonucu Şekil 7.34 ve Şekil 7.35'de, Model 2 (P10-0) için elde edilen analiz sonucu ise Şekil 7.36 ve 7.37'de sunulmuştur. Şekil 7.34-Şekil 7.37'de sunulan görseller sadece dolgu kısmını göstermektedir.

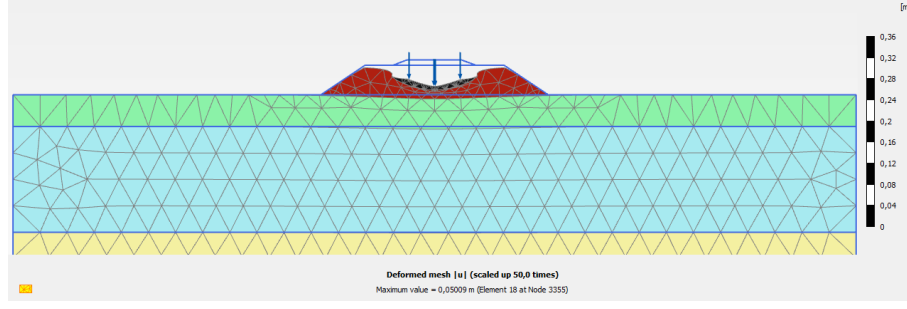


Şekil 7.34 Model 1 (P0-0) için yol dolgusu analizleri

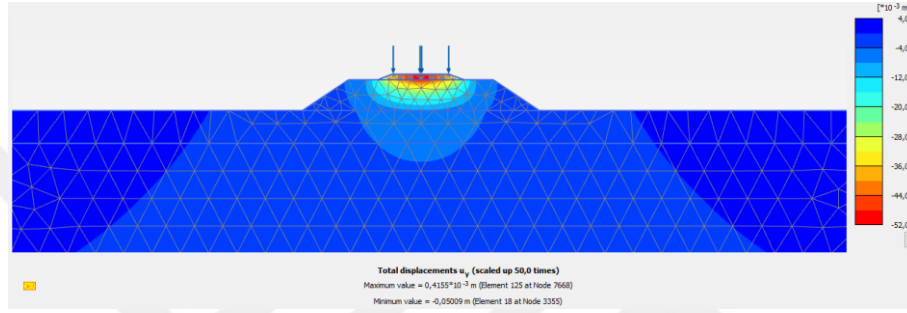


Şekil 7.35 Model 1 (P0-0) için yol dolgusu analizleri

Şekil 7.34 ve Şekil 7.35'de sunulan analiz sonuçlarında da görüldüğü üzere, DÇ çevrimine maruz kalmayan bir yol dolgusunun (katkısız zemin-P0) oturma değeri 0,01276 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.36 Model 2 (P10-0) için yol dolgusu analizleri

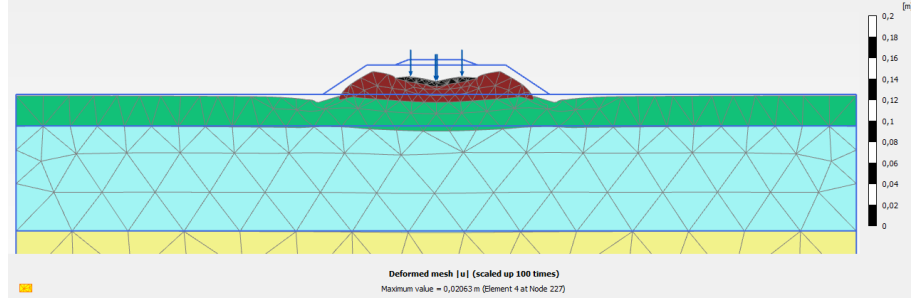


Şekil 7.37 Model 2 (P10-0) için yol dolgusu analizleri

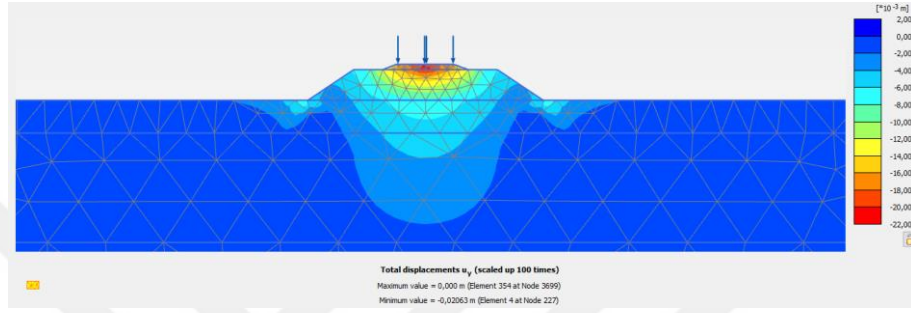
Şekil 7.36 ve Şekil 7.37’de sunulan analiz sonuçlarında, DÇ çevrimine maruz kalmayan bir yol dolgusunun (katkılı zemin-P10) oturma değeri 0,05009 m olarak elde edilmiştir.

Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’te katkısız zeminin, Şekil 7.36 ve Şekil 7.37’de ise katkılı zeminin yol dolgusunda kullanılması durumunda elde edilen oturma değerleri sunulmuştur. P0-0 zeminin oturma değeri 0,01276 m, P10-0 zeminin oturma değeri ise 0,05009 m’dir. Katkısız zeminin oturma değeri %10 mFDM katkısı ilave edilmesi ile %75 artmıştır. mFDM, katkısız zeminin oturma davranışını olumsuz yönde etkilemiş, bu durum da önceki bölümlerde elde edilen sonuçları destekleyici nitelikte olmuştur.

Model 3 (P0-11) için elde edilen analiz sonucu Şekil 7.38 ve Şekil 7.39’da sunulmuştur. Aynı zamanda, DÇ çevrimlerinde uygun sıcaklık değerlerine erişilebildiğinin görülebilmesi için temsili olarak 4. gün (2. çevrim), 12. gün (6. çevrim) ve 22. gün (11. çevrim) sonunda elde edilen sıcaklık değişimleri de Şekil 7.40, Şekil 7.41 ve Şekil 7.42’de sunulmuştur.

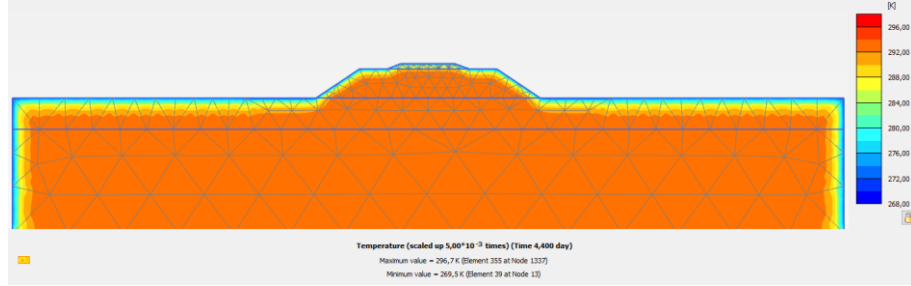


Şekil 7.38 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri

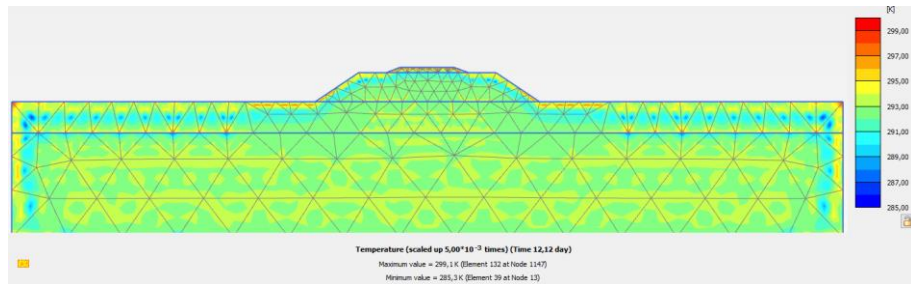


Şekil 7.39 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri

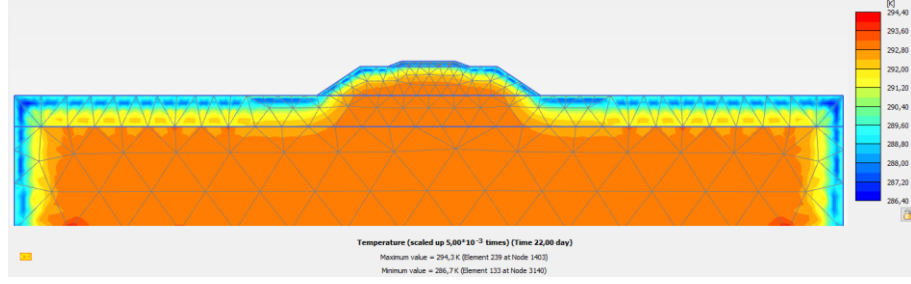
Şekil 7.38 ve Şekil 7.39’da sunulan analiz sonuçlarında, DÇ çevrimine maruz kalan bir yol dolgusunun (katkısız zemin-P0) oturma değeri 0,02063 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.40 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (2. çevrim)



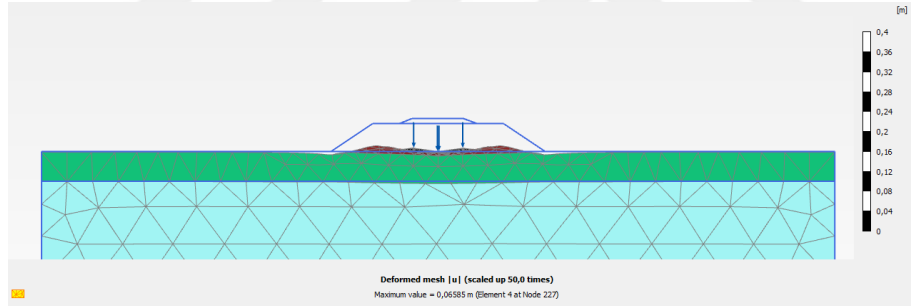
Şekil 7.41 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (6. çevrim)



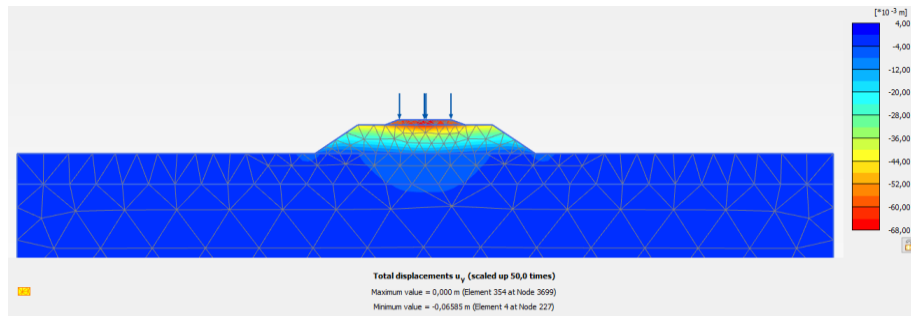
Şekil 7.42 Model 3 (P0-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (11. çevrim)

Şekil 7.38 ve Şekil 7.39’da sunulan analiz sonuçlarında, DÇ çevrimine maruz kalan bir yol dolgusunun (P0) 2. çevrim, 6. çevrim ve 11. çevrim sonundaki sıcaklık dağılımları hedeflenen sıcaklık değerlerinde ölçülmüştür.

Model 4 (P10-11) için elde edilen analiz sonucu Şekil 7.43 ve Şekil 7.44’te sunulmuştur. Aynı zamanda, DÇ çevrimlerinin görülebilmesi için temsili olarak 4. gün (2. çevrim) ve 22. gün (11. çevrim) sonundaki sıcaklık değişimleri de Şekil 7.45 ve Şekil 7.46’da sunulmuştur.

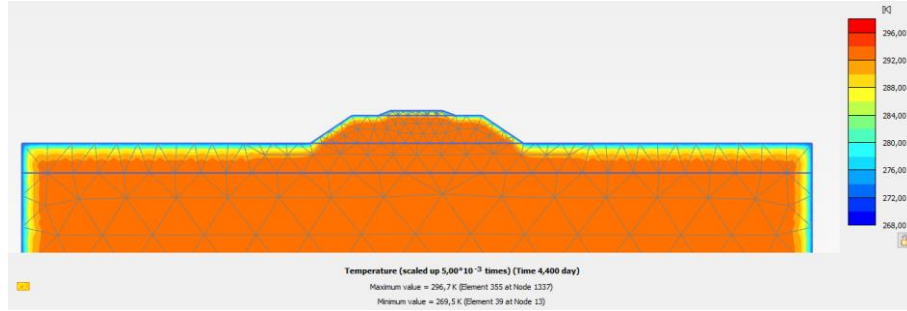


Şekil 7.43 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri

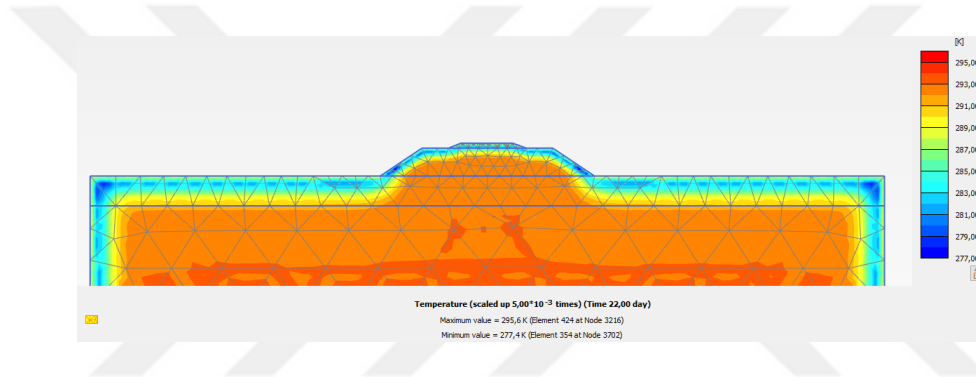


Şekil 7.44 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri

Şekil 7.43 ve Şekil 7.44’te sunulan analiz sonuçlarında, DÇ çevrimine maruz kalan bir yol dolgusunun (katkılı zemin-P10) oturma değeri 0,06585 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.45 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (2. çevrim)



Şekil 7.46 Model 4 (P10-11) için yol dolgusu analizleri – sıcaklık ölçümleri (11. çevrim)

Şekil 7.45 ve Şekil 7.46’da sunulan analiz sonuçlarında, DÇ çevrimine maruz kalan bir yol dolgusunun (P10) 2. çevrim ve 11. çevrim sonundaki sıcaklık dağılımları hedeflenen sıcaklık değerlerinde ölçülmüştür.

Şekil 7.34 ve Şekil 7.46’da sunulan analiz sonuçları toplu bir biçimde Tablo 7.10’da sunulmuştur.

Tablo 7.10 Plaxis2D analiz sonuçları

<i>Model</i>	<i>Oturma Değeri, (m)</i>
Model 1 (P0-0)	0,01276
Model 2 (P10-0)	0,05009
Model 3 (P0-11)	0,02063
Model 4 (P10-11)	0,06585

Tablo 7.10’da da görüldüğü üzere, P0-0’ın oturma miktarı 0,01276 m, P0-11’in oturma miktarı 0,02063 m, P10-0’ın oturma miktarı 0,05009 m, P10-11’in oturma miktarı 0,06585 m’dir. P0-0’ın oturma miktarı, 11 DÇ çevrimi sonunda %61 artmıştır. P10-0’ın oturma miktarı ise, 11 DÇ çevrimi sonunda %31 artmıştır. Yapılan laboratuvar ve küçük ölçekli model deneylerde elde edildiği gibi mFDM ilavesi, dolgu zeminin davranışını olumlu yönde etkilemiştir.



8 SONUÇ

Bu tez çalışmasında, soğuk bölge ikliminde yer alan ve yılda birden fazla kez donma çözülmeye maruz kalan yol dolgusu olarak kullanılacak zeminlerin, donma çözülme çevrimleri sonundaki mühendislik davranışlarının iyileştirilebilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Farklı donma çözülme çevrimlerine (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11) maruz kalan yüksek kaolin içeriğine (%89) sahip don hassasiyeti yüksek olan yüksek plastisiteli killi silt (MH) zeminin, parafin-tetradekan bazlı mikrokapsüllenmiş mFDM'lerle (%5, %8, %10, %12) iyileştirilmesi laboratuvar deneyleri (tek boyutlu ödometre, serbest basınç, düşen seviyeli permeabilite) ile incelenmiş ve zeminin iyileştirme öncesindeki durumu ile karşılaştırılması yapılarak meydana gelen davranış değişiklikleri belirlenmiştir. Mineralojik, morfolojik, termal ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiş, farklı oranlardaki mFDM katkısının zeminin fiziksel, kimyasal, hacim, mukavemet, oturma, geçirgenlik davranışı üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Yapılan laboratuvar deneyleri ile en olumsuz koşulda (DÇ çevrim sayısı) zeminin geçirgenlik ve mukavemet davranışında en iyi iyileşme performansı gösteren mFDM katkı oranı belirlenmiş, bu DÇ çevrim sayısı ve mFDM katkı oranı dikkate alınarak küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Küçük ölçekli laboratuvar model deneylerinden elde edilen zemin davranışı dikkate alınarak da, aynı katkı oranı ve çevrim sayısı için Plaxis2D yazılımında sayısal analiz modelleri kurulmuş ve yük-deformasyon davranışı küçük ölçekli laboratuvar model deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonunda gözlemlenen davranışlardan donma çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerin incelenmesi için yapılacak sayısal analizlerde kullanılmak üzere gerekli girdi parametreleri (termal ve rijitlik) elde edilmiştir. Yapılan araştırma ve incelemeler neticesinde elde edilen veriler değerlendirilmiş ve bu veriler ışığında şu sonuçlara ulaşılmıştır.

mFDM ilave edilmesi, zeminin donma çözülmeye maruz kalıp kalmaması gözetilmeksizin, zeminin fiziksel ve mekanik davranışında değişiklikler meydana getirmiştir. Bu değişikliklerde, mFDM ve zeminin dane boyutunun birbirine

oldukça yakın olması (homojen karışımların oluşması) çok önemli bir rol oynamıştır.

Artan mFDM oranı ile zeminin likit limit değeri %19 artmış, plastisite indeksi değeri ise mFDM ilavesinden çok etkilenmemiştir. Kıvam limitlerinde değişimler meydana gelse de zemine ilave edilen farklı oranlardaki mFDM, zemin sınıfını ve don hassasiyet sınıfını değiştirmemiştir. Artan mFDM oranı ile zeminin optimum su muhtevası değerinde %11 artış, maksimum kuru yoğunluk değerinde ise 0,28 gr/cm³ azalma meydana gelmiştir. mFDM, zeminin maksimum kuru yoğunluğunu azaltırken, likit limit ve optimum su muhtevasını ise büyük oranda arttırmıştır.

mFDM ilave edilmesi, 11 DÇ çevriminin sonunda %74 mukavemet kaybı meydana gelen katkısız zeminin (P0) başlangıç mukavemetini azaltmıştır. Ancak, mFDM ilave edilmesi DÇ çevrimleri boyunca zeminin mukavemet değerini sabit tutmuştur. Ayrıca, mFDM oranının artması, zeminin başlangıç mukavemetinde artış sağlamış, DÇ çevrimlerinin sonunda en iyi mukavemet değeri %15 kayıp ile %10 mFDM katkı oranı ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, mFDM ilavesi ile zeminin hacim değişimi ve göçme davranışında da değişiklikler meydana gelmiş, artan mFDM oranı ile zeminin pul pul dökülerek göçtüğü gözlemlenmiştir. Artan mFDM oranı ile toplamda daha az hacim değişimi meydana gelerek, özellikle %10 mFDM katkı oranı hacim değişimini katkısız zemine göre 7,25 cm³ azaltmış, boşluk yapısını ise %5,1 oranında iyileştirmiştir. Bu da mukavemet davranışı ile ilişkili olup, mukavemeti olumlu yönde etkilemiştir. Tüm bunların yanı sıra, farklı koşullar (desikatörde bekletilme) için de %10 mFDM oranı, diğer katkı oranlarına göre zeminin mukavemetinde %14 kayıp ile, tüm DÇ çevrimi/desikatörde bekletilme (kısa ve uzun süreli koşullar) durumları için en iyi performans gösteren katkı oranı olaretak belirlenmiştir. Böylece, %10 mFDM'nin sadece DÇ çevrimlerinde değil, normal koşullarda da zeminin mukavemetini iyileştirdiği kanıtlamıştır. Bu, %10 mFDM'nin zeminin DÇ davranışı üzerinde en etkili katkı oranı olduğu ve zeminin donma önleme performansını iyi yönde etkilediğini göstermektedir.

mFDM ilave edilmesi, zeminin (P0) başlangıç oturma değerini 11 DÇ çevriminde %38 arttırmıştır. Ancak, mFDM ilave edilmesi DÇ çevrimleri boyunca zeminin oturma değerini sabit tutmuştur. Ayrıca, mFDM oranının artması, zeminin başlangıç oturma değerinde azalma sağlamış, DÇ çevrimlerinin sonunda en az oturma değeri %21 artış ile %10 mFDM katkı oranında elde edilmiştir.

mFDM katkısının (%5, 8 ve 10), düşük konsolidasyon gerilmeleri (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa) altında ihmal edilebilecek mertebede etkilediği, artan konsolidasyon gerilmeleri altında ise mikrokapsüllerin patlaması sebebiyle, çok dar bir aralıkta değişim meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, %10 mFDM oranının, zeminin serbest basınç mukavemetinde olduğu gibi oturma davranışında da başarılı olduğunu göstermiştir.

mFDM ilave edilmesi DÇ çevrimine maruz kalmayan zeminin hidrolik iletkenlik davranışında (10^{-7} cm/sn mertebesinde) herhangi bir değişime sebebiyet vermemiştir. Ancak, artan mFDM oranı ile zemin doygunluk değerine daha hızlı ulaşmış, bu da deney sürelerinin azalmasında etkili olmuştur.

mFDM ile zemin arasında sadece fiziksel reaksiyon meydana gelmiş, herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmemiş, mFDM zemin ile homojen bir karışım oluşturmuş, özellikle %10 mFDM katkı oranı zemin tabakaları arasına yerleşerek boşlukları doldurmuş, 11 DÇ çevrimi sonunda katkısız zeminin boşluk hacmini %7,69'dan %2,59'a kadar azaltmıştır. Boşluk yapısında meydana gelen bu iyileşme ile zeminin davranışı için en uygun oranın %10 mFDM olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, mFDM mükemmel ısı depolama kapasitesi sayesinde, zeminin sıcaklık değişimini önemli ölçüde etkileyerek, donmaya geçiş sürecini arttırmış, donma süresini azaltmış, benzer şekilde erimeye geçiş süresini ve erime süresini azaltmıştır.

Oturma ve mukavemet davranışları bir arada düşünüldüğünde, yapılan deneyler ile elde edilen sonuçlardan, mFDM katkısının ısı alıp-verme özelliği ile DÇ çevrimleri sırasında zeminin mukavemetinde ve oturmasında meydana gelen olumsuz değişimleri etkili bir biçimde azalttığı, bu zemin türü ile paraffin bazlı mFDM'nin %10 oranında kullanılmasının, MH zemin türü ile uyum sağladığı, zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden geçirgenlik ve mukavemet davranışını donma-çözülme çevrimleri boyunca etkilenmeden sabit tuttuğu tespit edilmiştir.

Yapılan laboratuvar deneylerinde belirlenen en olumsuz durum (11 çevrim) ve en uygun katkı oranı (%10) dikkate alınarak, 30 cm x 30 cm bir plexiglass hücrede yapılan model deneyler, laboratuvar deneyleri ile karşılaştırılmış, DÇ çevriminin katkısız zeminin (P0) yük-deformasyon davranışını olumsuz şekilde etkilediği, %10 mFDM katkı oranının katkısız zeminin dayanımını başta azalttığı, ancak 11

DÇ çevrim sonunda sabit tuttuğu hatta dayanımını bir miktar arttırdığı belirlenmiştir. Yapılan küçük ölçekli model deney verileri ile de %10 mFDM oranının katkısız zemine göre mukavemet ve oturma davranışı için en uygun katkı oranı olduğu belirlenmiştir. Böylece, laboratuvar ve küçük ölçekli model deney verileri birbirini desteklemiştir.

Laboratuvar ve küçük ölçekli model deneylerin ardından, %10 mFDM katkı oranı ve 11 DÇ çevrim sayısı dikkate alınarak Plaxis2D yazılımında sayısal analiz modelleri kurulmuş, analizlerden elde edilen veriler model deney sonuçları (yük-penetrasyon davranışı) ile karşılaştırılmış, DÇ çevriminin katkısız zeminin rijitlik parametrelerini azalttığı, %10 mFDM katkı oranının ise 11 DÇ çevrimi sonunda dahi zeminin rijitlik parametrelerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Böylelikle, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan MH zeminin en iyi iyileşmeyi %10 mFDM katkı oranı ile yapabileceği belirlenmiş olup, zeminin DÇ davranışının incelenmesi için yapılacak olan sayısal analizlerde kullanılacak girdi parametreleri elde edilmiştir.

Yapılan tüm bu araştırmalar ve değerlendirmeler sonucunda, DÇ süreçlerinde mFDM 'nin termal etkilerinin güçlü olduğu tespit edilmiştir. Zemine mFDM ilave edilmesi, DÇ'nin zemin boşluklarındaki etkisini azaltmış, zeminin değişen ve zayıflayan makro ve mikro yapısını iyileştirmiştir. Bu sonuçların alınmasında en önemli hususun; mFDM'nin türü, zeminle uyumluluğu, kimyasal kararlılığı, termal özellikleri ve çevreye zarar vermemesidir. Böylece, çalışma ortamının iklim koşullarına ve projenin hedef sıcaklığa göre seçilen, ilgili sıcaklık şartlarında faz değiştirme özelliği gösteren mFDM, zeminin iç sıcaklığını kontrol etmiş, zeminin DÇ çevrimleri sonundaki davranışını iyileştirmiştir.

- Abu-Hamdeh, N.H. (2002). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*. 86(1), 97-102. doi:10.1016/S1537-5110(03)00112-0.
- Aksakal, E.L. (2009). Polimer (pva&pam) ve humik asit (ha) uygulamalarının DC süreçlerine maruz kalan toprakların stabilite ölçütleri üzerine etkileri. Doktora tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aldaoood, A., Bouasker, M. & Al-Mukhtar, M. (2014). Impact of freeze–thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils. *Cold Regions Science and Technology*, 99, 38-45.
- Aldaoood, A., Bouasker, M. & Al-Mukhtar, M. (2016). Effect of water during freeze–thaw cycles on the performance and durability of lime-treated gypseous soil. *Cold Regions Science and Technology*, 123, 155–163.
- Alizadeh, A. (2018). Donma-çözülme çevrimlerinin kireç katkılı killerin şişme basınç davranışına etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alkan, E. (2009). Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), 130-135.
- Alkire, B. & Morrison, J. (1982). Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading. *Transportation Research Record*, 918, 15–22.
- Allman, M. A. & Atkinson, J. H. (1992). Mechanical properties of reconstituted Bothkennar soil. *Géotechnique*, 42, 289–301.
- Anusha, A. S. (2016). Phase Change Materials. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4(2), ISSN: 2091-2730.
- Aoyama, K., Ogawa, S. & Fukuda, M. (1985). Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing. In: Kinosita, S., Fukuda, M. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, 5–7 August 1985, Sapporo, Japan. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp. 217–222.
- Asharf, I., Ahad, M.Z. & Jahangir Durrani, M.A.Q. (2019). Synthesis and characterization of PCM based insulated concrete for thermal energy storage. *Materials Research Express*. 8(7). doi:10.1088/2053-1591/ac118a
- ASTM D6913-04R2009; Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004; Volume 4, pp. 1–35. 40.

- ASTM D7928-17; Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017; pp. 1–25. 41.
- ASTM D4318-00; Standards for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils This c of Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2000; Volume 4, pp. 1–14. 42.
- ASTM D1557; International Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2003; Volume 3, pp. 1–10.
- ASTM D2166; Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014; pp. 1–7.
- ASTM D1557; International Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2003; Volume 3, pp. 1–10.
- Athukorallage, B., Dissanayaka, T., Senadheera, S. & James, D. (2018). Performance analysis of incorporating phase change materials in asphalt concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 164, 419–432.
- Aydın, K. (2018). Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kilin donma-çözülme davranışının ve kür sürelerinin tek eksenli basınç değeri üzerinde etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Bağrıaçık, B., Uslu, F. M., Yiğittekin, E. S., Delik, A. & Dinçer, S. (2021). Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme etkisindeki davranışı. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 10(2), 704-711. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.898554>
- Bejan, A. & Kraus, A.D. (2003). Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, № 2, p. 207-221.
- Benoit, G.R. (1973). Effect of freeze-thaw cycles on aggregate stability and hydraulic conductivity of three soil aggregate sizes. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 37, 3-5.
- Benoit, G. R. & Bornstein, J. (1970). Freezing and thawing effects on drainage. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 551-557.
- Benson, C. H., Abichou, T. & Olson, M. (1995). Winter effects on the hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(1), 69–79.
- Bentz, D. P. & Turpin, R. (2007). Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites*, 29, 527–532.

- Beskow, G. (1935). Soil Freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. The Swedish Geological Society, translated by J. O. Osterberg, Evanston, Illinois, The Technological Institute, Northwestern University, 1947, pp. 145.
- Bin-Shafique, S., Rahman, K. & Azfar, I. (2011). The effect of freezing–thawing cycles on performance of fly ash stabilized expansive soil subbases. *GeoFrontiers (ASCE)*, pp. 697–706.
- Binal, A. & Viran, A. G. P. (2015). Investigation of freezing and thawing effects on the physico-mechanical properties of Ankara clay. In 10th International Congress on Civil Engineering, Tehran.
- Binal, A. & Viran, A. G. P. (2018). Effects of repeated freeze–thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11). doi:10.1007/s12517-018-3592-5.
- Bisal, F. & Neilsen, K.F. (1964). Soil aggregates do not necessarily breakdown over-winter. *Soil Science*, 98, 345-346.
- Brinkgreve, B.J.R. (2005). Computational Geotechnics for Experienced Users, Plaxis.
- Boan, Y. (2005). Physical Mechanism and Characterization of Smart Thermal Clothing (PhD Thesis). The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- Boz, A. & Sezer, A. (2018). Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 359-366.
- Brandl, H. (2008). Freezing-Thawing behaviour of soils and unbound road layers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3, 4-12.
- Broms, B. & Yao, L.Y.C. (1964). Shear Strength of A Soil After Freezing and Thawing. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1-25.
- Bronick, C.J. & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Bugaje, I. M. (1997). Enhancing the thermal response of latent heat storage systems. *International Journal of Energy Research*, 65, 759-766.
- Bullock, M.S., Kemper, W.D. & Nelson, S.D. (1988). Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 770–776.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C.D., De Gracia, A. & Fernández, A.I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675–1695.

- Cao, C.B., Luo, Y.M. & Li, W.H. (2013). Effect of polyethylene glycol on heat storage properties of leachite and its mixture. *Chemical Engineering New Type Materials*, 41, 137–139.
- Casagrande, A. (1932) A new theory of frost heaving. *Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting*, 11(1), 168-172.
- Casey, B. & Germaine, J. T. (2013). Stress dependence of shear strength in fine-grained soils and correlations with liquid limit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 139(10), 1709–1717.
- Cervi, M. (2005). Experimental investigation on the hydraulic conductivity of compacted clay subjected to cyclic freezing. Master thesis. Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- Chaduvula, U., Viswanadham, B. V. S., & Kodikara, J. (2017). A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber–reinforced expansive clay. *Applied Clay Science*, 142, 163–172. Doi: 10.1016/j.clay.2017.02.008.
- Chamberlain, E.J. (1981). Frost susceptibility of soils: review of index tests. Monograph 81-2. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover.
- Chamberlain, E. J. & Blouin, S. E. (1977). Frost action as a factor in enhancement of the drainage and consolidation of fine-grained dredged material. U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Dredged Material Research Program, Technical Report D-77-16.
- Chamberlain, E. J. & Blouin, S. E. (1978). Densification by freezing and thawing of fine material dredged from waterways. In *Proceedings: Permafrost 3rd International Conference*, pp. 623-628.
- Chamberlain, E. & Gow, A. (1979). Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology*, 13, 73–92.
- Chamberlain, E., Iskandar, I. & Hunsicker, S.E. (1990). Effects of freeze–thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils. In K.R. Cooley (Ed.), *Proceedings of the international symposium on frozen soils impacts on agricultural, range, and forest lands* (pp. 145–155). CRREL Special Report 90-1. USACE Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Chen, Z. Y., Zhou, J. X. & Wang, H. J. (1994). *Soil Mechanics*. Tsinghua University Press, Beijing.
- Chen, Y., Huang, Y., Wang, S., Zhu, R. & Liu, X. (2021). Freeze-thaw Performance of Phase Change Material (PCM) Incorporated Canal Foundation Expansive Soil. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-401566/v1>.
- Chen, Y., Huang, Y., Wu, M. & Wang, S. (2022). Fly Ash/Paraffin Composite Phase Change Material Used to Treat Thermal and Mechanical Properties of Expansive Soil in Cold Regions. *J. Renew. Mater.*10, 1153–1173.

- Chen, Y., Huang, Y., Wang, S. & Mu, Y. (2023). Effects of Phase Change Materials on the Freeze–Thaw Performance of Expansive Soil. *J. Mater. Civ. Eng.* 35, 04023206.
- Chen, M., Wan, L. & Lin, J. (2012). Effect of phase-change materials on thermal and mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 40, 746–753.
- Chen, Y., Wang, H., You, Z. & Hossiney, N. (2020). Application of phase change material in asphalt mixture – A review. *Construction and Building Materials*, 263, 120219.
- Cheng, Y.F. (2019). Study on cooling effect of PEG/SiO₂ phase change particles on asphalt mixture. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 36, 7–13.
- Crespoa, A., Barreneche, C., Ibarra, M. & Platzera, W. (2018). Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium high temperatures – A review. *Science Direct*, 4860.
- Czurda, K. A. & Hohmann, M. (1997). Freezing effect on shear strength of clayey soils. *Applied Clay Science*, 12, 165–187.
- Coop, M. R. (1991). The mechanics of uncemented carbonate sands. *Géotechnique*, 40, 607–662.
- Cruse, R.M., Roberto, M. & Mize, C.W. (2001). Surface residue effects on erosion of thawing soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 178-184.
- Cui, Y., Xie, J., Liu, J. & Pan, S. (2015). Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving. *Procedia Engineering*, 121, 763–770.
- Culley, R. (1971). Effect of freeze-thaw cycling on stress-strain characteristics and volume change of a till subjected to repetitive loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 359-371.
- Çalık, Y., Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş. ve Yetimoğlu, T. (2019). Polipropilen lif ile rastgele donatılan bir CH kil zemininin donma-çözülme çevrimlerinde serbest basınç dayanımının araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 911-921.
- Çiftliklioğlu. (2018). Donma-çözülme çevrimlerinin uçucu kül ve kireç katkılı killerin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dal, İ. (2020). Yüksek Performanslı Stabil Faz Değişim Malzemesinin Geliştirilmesi. Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bilecik.
- Daniel, D. (1989). In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 115(9), 1205-1226.

- Dayioglu, M., Cetin, B. & Nam, S. (2017). Stabilization of expansive belle fourche shale clay with different chemical additives. *Applied Clay Science*, 146, 56–69.
- De Oliveira, T.S., De Costa, L.M. & Schaefer, C.E. (2005). Water-dispersible clay after wetting and drying cycles in four Brazilian oxisols. *Soil & Tillage Research*, 83, 260-269.
- Dehdezi, P. & Dawson, A. (2011). Enhancement of Soil ThermoPhysical Properties Using Microencapsulated Phase Change Materials for Ground Source Heat Pump Applications. *Applied Mechanics and Materials*, 110-116 (2012) pp 1191-1198. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.1191.
- Duarte, A.P.L., de Campos, T.M.P., Araruna, J.T. & Rocha Filho, P. (2006). Thermal properties for unsaturated soils. *Unsaturated Soils 2006*.
- Edwards, L.M. & Burney, J.R. (1987). Soil erosion losses under freeze/thaw and winter ground cover using a laboratory rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering*, 29, 109-115.
- Edwards, L.M., Burney, J.R. & Frame, P. A. (1994). Relationships between rill sediment and flow time varying with freezing, groundcover, compaction and slope on a Prince Edward Island (Canada) fine sandy loam. In *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport* proceedings of the Canberra Symposium, December 1994, IAHS Publ. no. 224.
- Erdemir, F. ve Hekimoğlu, G. (2022). Termal analizler deneyleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Eylül.
- Erişgen, G. (2022). Enerji kazıklarının uzun dönem performansı ve tasarımı. Doktora tezi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Erol, A. (2007). Experimental investigation of strength and freeze-thaw resistance of Class C fly ash doped silts. Master's Thesis. Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology.
- Eskişar, T., Altun, S. & Kalipcilar, I. (2015). Assessment of strength development and freeze-thaw performance of cement treated clays at different water contents. *Cold Regions Science and Technology*, 111, 50–59.
- Esmaeeli, H.S., Farnam, Y., Haddock, J.E., Zavattieri, P.D. & Weiss, W.J. (2018). Numerical analysis of the freeze-thaw performance of cementitious composites that contain phase change material (PCM). *Mater. Des.*, 145, 74–87.
- Farid, M. M., Khudhai, A. M., Ali, S. & Razack, K. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597–1615.

- Farnam, Y., Krafcik, M., Liston, L., Washington, T., Erk, K., Tao, B. & Weiss, J. (2016). Evaluating the use of phase change materials in concrete pavement to melt ice and snow. *J. Mater. Civ. Eng.*, 28, 1–10.
- Farouki, O. T. (1986). Thermal Properties of Soils. *Series on Rock and Soil Mechanics*, Vol. 11, Trans Tech, 136 pp.
- Feldman, D., Shapiro, M. M. & Banu, D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials*, 13, 1-10.
- Ferber, V., Auriol, J. C., Cui, Y. J. & Magnan, J. P. (2009). On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology*, 104(3–4), 200–210. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.10.008.
- Figueiredo, A., Lapa, J., Vicente, R. & Cardoso, C. (2016). Mechanical and thermal characterization of concrete with incorporation of microencapsulated PCM for applications in thermally activated slabs. *Constr. Build. Mater.*, 112, 639–647. DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.225.
- Formanek, G.E., McCool, D.K. & Papendick, R.I. (1984). Freeze-thaw and consolidation effects on the strength of a wet silt loam. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 27, 1749–1752.
- Gençdal, H.B., Berilgen, S.A. ve Kılıç, H. (2020). Sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil bir zeminde hacim değişimi davranışının farklı başlangıç koşulları için incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3), 1421-1435.
- Ghazavi, M. & Roustaie, M. (2010). The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology*, 61(2-3), 125-131.
- Ghazavi, M. & Roustaei, M. (2013). Freeze–thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer. *Cold Regions Science and Technology*, 89:22–29. doi:10.1016/j.coldregions.2013.01.002.
- Ghuman B, S, & Lal, R. (1985). Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils. *Soil Science*, 139, 74–80.
- Gök, Ö., Yılmaz, M. Ö., Yılmaz, S., Turgut, B., Mazman, M., Beyhan, B., Şahan, N., Paksoy, H. Ö. ve Evliya, H. (2008). Beyaz eşyalarda faz değiştiren maddelerde gizli ısı depolama yöntemi ile enerji verimliliğinin araştırılması. *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İstanbul.
- Graham, J. & Au, V. (1985). Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(1), 69–78.
- Gullu, H. & Khudir, A. (2014). Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber, and lime. *Cold Regions Science and Technology*, 106, 55-65. doi: 10.1016/j.coldregions.2014.06.008

- Guo, H., Sun, Q., Yuan, C., Li, X. & Zhao, Y. (2024). Experimental investigation on the physical and mechanical properties of silty clay enhanced by microencapsulated phase change materials. *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e03151.
- Guo, M., Liang, M., Jiao, Y., Zhao, W., Duan, Y. & Liu, H. (2020). A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 258, 119565.
- Gutierrez, M., Nygard, R., Hoeg, K. & Berre, T. (2008). Normalized undrained shear strength of clay shales. *Engineering Geology*, 99(1–2), 31–39.
- Hamze, Y. (2014). Concrete durability in harsh environmental conditions exposed to freeze-thaw cycles. *Physics Procedia*, 55, 265–270.
- Hazirbaba, K. & Gullu, H. (2010). California bearing ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 50–60. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.05.006
- Hohmann-Porebska, M. (2002). Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. *Applied Clay Science*, 21, 77–87.
- Horiguchi, K. (1987). Effect of cooling rate on freezing of a saturated soil. *Cold Regions Science and Technology*, 14, 147–153.
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A. & Al-Mukhtar, M. (2015). Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays. *Cold Regions Science and Technology*, 119, 151-157.
- Hu, S.G., Li, Q., Huang, S.L. & Ding, Q.J. (2009). Study on feasibility of leach-green mixture with polyethylene glycol as phase variable material. *Highway*, 7, 291–295.
- Işık, A. (2014). Sıkıştırılmış zeminlerde donma-çözülme olayının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ismail, K.A.R., Lino, F.A.M., Machado, P.L.O., Teggat, M., Arıcı, M., Alves, T.A. & Teles, M.P.R. (2022). New potential applications of phase change materials: A review. *Journal of Storage Materials*, 53, 105202.
- Jafari, M. & Esna-Ashari, M. (2012). Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 21–29.
- Johansen, O. (1975). Thermal Conductivity of soils. Ph.D. Thesis, Norway, USA Corps of Engineers ADA044002.
- Jafari, M. & Shafiee, A. (2004). Mechanical behavior of compacted composite clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1152–1160.

- Kanimozhi, B., Harish, K., Tarun, B. S., Reddy, P. & Sujeeth, P. S. (2017). Charging and discharging processes of thermal energy storage system using phase change materials. *IOP Publishing*, 197, 012040.
- Karabulut, K. (2018). Ağrı ilinin ekonomik-sosyal profili. AİÇÜ Yayınları, Yayın No: 19, ISBN: 978-605-81711-0-7. Basım Yeri Ankara.
- Kemper, W.D. (1965). Aggregate stability. In C.A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I* (pp. 511-519). American Society of Agronomy.
- Keskin, N. S., Sungur, A., Akan, R. & Uzundurukan, S. (2017). İnce daneli zeminlerde katkı maddelerinin ve donma-çözülme çevriminin serbest basınç dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 473–478.
- Khot, G. S. & Khanwalkar, P. M. (2016). Research article thermal energy storage system using phase change material: A review. *International Journal of Current Research*, 8(9), 37884-37889.
- Khudir, A. (2014). Donma çözülme çevrimlerinin taban külü, kireç, jüt fiber ve çelik fiber ile iyileştirilmiş ince daneli zeminin dayanımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Gaziantep İnşaat Müh. Bölümü.
- Kim, I. S., Choi, S. Y., Choi, Y. S. & Yang, E. I. (2021). An experimental study on absorptivity measurement of superabsorbent polymers (SAP) and effect of SAP on freeze-thaw resistance in mortar specimen. *Construction and Building Materials*, 267, 120974. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120974>.
- Kim, W. H. & Daniel, D. E. (1992). Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 118, 1083–1097.
- Konrad, J.M. (1989). Physical processes during freeze–thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology*, 16, 291–303.
- Konuklu, Y. (2008). Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kosny, J. (2015). PCM- Enhanced Building Components. Springer, Switzerland.
- Kravchenko, E., Liu, J. Chang, D, Rao, Y. & Krainiukov, A. (2020). Study of the thermal field of a mixture of soil and PCM materials with simulation of the warming effect during a phase change. *Construction and Building Materials*.262(2020)120818.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120818>.
- Kravchenko, E., Liu, J. & Li, X. (2021). Numerical modeling of the thermal performance of soil containing microencapsulated PCM. *Construction and*

- Kuosa, H., Ferreira, R. M., Holt, E., Leivo, M. & Vesikari, E. (2014). Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. *Cement and Concrete Composites*, 47, 32–40.
- Kut. (2023). Kompozit Malzeme ve Teknik Tekstil Prototip Üretim ve Uygulama Merkezi Teknik Destek Projesi.
- Lai, Y.M., Li, S.Y. & Qi, J.L. (2008). Strength distributions of warm frozen clay and its stochastic damage constitutive model. *Cold Regions Science and Technology*, 53(2), 200-215. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.11.001.
- Lecompte, T., Le Bideau, P., Glouannec, P., Nortershauser, D. & S. Le Masson. (2015). Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy Build.*, 94, 52–60. doi:10.1016/J.ENBUILD.2015.02.044.
- Lee, W., Bohra, N., Altschaeffl, A. & White, T. (1995). Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 559-568.
- Lehrsch, G. A., Sojka, R. E., Carter, D. L. & Jolley, P. M. (1991). Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1401-1406.
- Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M. & Konrad, J.M. (1991). Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain Sea clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(5), 690–697.
- Li, G., Ma, W., Mu, Y., Zhou, C. & Mao, Y. (2011). Process and mechanism of impact of freezing and thawing cycle on collapse deformation of compacted loess. *China Journal of Highway and Transport*, 24(5), 1-5.
- Li, G., Wei, M., Zhao, S. & Mao, Y. (2012). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil. In *Geotechnical Special Publication 228, Geo-Congress 2012* (pp. 70-77). doi: 10.1061/9780784412473.008.
- Li, R., Shi, H., Flerchinger, G. N., Akae, T. & Wang, C. (2012). Simulation of Freezing and Thawing Soils in Inner Mongolia Hetao Irrigation District, China. *Geoderma*, 173–174, 28–33.
- Li, S., Niu, F., Lai, Y., Pei, W. & Yu, W. (2017). Optimal design of thermal insulation layer of a tunnel in permafrost regions based on coupled heat-water simulation. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1264–1273.
- Li, X., Zhou, Z., Lv, X., Xiong, K., Wang, X. & You, Z. (2017). Temperature segregation of warm mix asphalt pavement: Laboratory and field evaluations. *Construction and Building Materials*, 136, 436–445.

- Lipson, D.A. & Schmidt, S.K. (2004). Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky Mountains. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(5), 2867-2879.
- Liu, D., Wang, Y. & Liang, J. (2021). Potential Applications of Phase Change Materials to Extend the Winter Construction Time of Earth-Rock Dam in Cold Regions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, ISSN 0899-1561. 33(8): 04021194.
- Liu, S.T., Ma, B. & Li, C. (2010). Effect of phase change materials on asphalt properties. *Heilongjiang Transportation Science and Technology*, 11, 46–47.
- Liu, Z., Wang, Y., Jia, J., Sun, H., Wang, H. & Qiao, H. (2020). Preparation and characterization of temperature-adjusting asphalt with diatomite-supported PEG as an additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32, 04020019.
- Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Li, Z. & Xu, L. (2020). Freeze-Thaw Performance of a Cement-Treated Expansive Soil; Elsevier B.V.: Amsterdam, The Netherlands. Volume 170, ISBN 1516146131.
- Luo, Z., Zheng, Y., Zhang, X., Wang, L., Gao, Y., Liu, K. & Han, S. (2023). Effect of Phase Change Materials on Mechanical Properties of Stabilized Loess Subgrade Subjected to Freeze–Thaw Cycle. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, ISSN 0899-1561. 35(8): 04023217.
- Ma, B., Chen, S., Wei, K., Liu, F. & Zhou, X. (2019). Analysis of thermoregulation indices on microencapsulated phase change materials for asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 208, 402–412.
- Ma, B., Li, J., Wang, X.M. & Xiao, N. (2011). Effect of composite shape-stabilized phase change material on asphalt mixture temperature. *Advanced Materials Research*, 311-313, 2151–2154.
- Ma, B., Wang, S.S. & Li, J. (2011). Study on application of PCM in asphalt mixture. *Advanced Materials Research*, 168, 2625–2630.
- Ma, B., Wang, X.M., Li, C., Li, Z.Q. & Liu, S.T. (2000). Application of phase change materials in asphalt concrete pavement analysis of foreground. *Highway*, 9, 115–118.
- Mahedi, M., Cetin, B. & Cetin, K.S. (2019). Freeze-Thaw Performance of Phase Change Material (PCM) Incorporated Pavement Subgrade Soil. *Constr. Build. Mater.* 202, 449–464.
- Mahmutluoğlu, B., & Bağrıaçık, B. (2020). Killi Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışlarında Cam Atık Çamurunun Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 783-795.

- Manning, B.J., Bender, P.R., Cote, S.A., Lewis, R.A., Sakulich, A.R. & Mallick, R. (2015). Assessing the feasibility of incorporating phase change material in hot mix asphalt. *Sustainable Cities and Society*, 19, 11–16.
- Mattila, H. R. (2006). Intelligent Textiles and Clothing. Woodhead Publishing Limited, *The Textile Institute*, Cambridge, England.
- Mbagwu, J.S.C. & Bazzoffi, P. (1989). Effect of antecedent matric potential on the stability of soil aggregates subjected to cyclic freezing and thawing as evaluated by three structural indices. *Soil Technology*, 2(1), 59-70.
- Mei, Q., Chen, J., Zhang, S., Hou, X., Zhao, J., Wang, J., Dang, H., Liu, G. & Wu, G. (2021). Experimental and nNumerical nnalyses of the thermal regime of a traditional embankment in permafrost regions. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021, 7185616, 13. <https://doi.org/10.1155/2021/7185616>
- Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H. & Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Appl. Energ.*, 139, 43–55.
- Mitchell, J.K. (1993). Fundamentals of soil behavior. John Wiley & Sons, Inc.
- Mitchell, J. K., Hopper, D. R. & Campanella, R. G. (1965). Permeability of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 91(4), 41-64.
- Mohammad, L.N., Hassan, M.M. & Kim, M. (2016). Effects of paver stoppage on temperature segregation in asphalt pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 4016200.
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles – An Overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536–1550. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.08.009>
- Moniz, S. R. (2009). The influence of effective consolidation stress on the normalized extension strength properties of resedimented boston blue clay. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Morgenstern, N. R. & Nixon, J. F. (1971). One-dimensional consolidation of thawing soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 558-565
- Mostaghimi, S., Young, R.A., Wilts, A.R. & Kenimer, A.L. (1988). Effect of frost action on soil aggregate stability. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 31, 435-439.
- Mu, Y., Ma, W., Li, G. & Mao, Y. (2011). Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(12), 1919-1925.

- Muñoz, G. F. (2016). Characterization, equation formulation and enhancement of phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) (Doctoral Thesis). Lleida University, Computer Science, Industrial Engineering.
- Murty, V. R. & Krishna, P. H. (2006). Stabilisation of expansive clay bed using calcium chloride solution. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement*, 10(1), 39–46. doi:10.1680/grim.2006.10.1.39.
- Mutlutuk, M., Altindag, R. ve Turk, G. (2004). A decay function model for the integrity loss of lock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 237-244.
- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F.J.B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P, Inamuddin, Kannan, A.M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 129, 491-253.
- Oman, M. S. & Lund, N. G. (2018). Designing base and subbase to resist environmental effects on pavements (No. MN/RC 2018-06). *Department of Transportation: St. Paul, MN, USA*.
- Ono, T. & Mitachi, T. (1997). Computer controlled triaxial freeze-thaw-shear apparatus. In *Ground Freezing 97* (pp. 335–339). A.A. Balkema, Rotterdam.
- Othman, M. & Benson, C. (1993). Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), 236–246.
- Ostrý, M., Dostálová, D., Klubal, T., Pøikryl, R. & Charvát, P. (2015). Microencapsulated phase-change materials for latent-heat storage: thermal characteristics. *Research Gate, MTAEC 9*, 49(5), 813-816, ISSN 1580-2949.
- Oztas, T. ve Fayetorbay, F. (2003). Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 52(1), 1-8.
- Ozgan, E., Ertürk, S. ve Serin, S. (2012). Donma ve çözülmenin kohezyonlu zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1(1), 7-16.
- Ozgan, E., Serin, S. & Vural, I. (2015). Effects of freezing and thawing on the consolidation settlement of soils. *Soil mechanics and foundation engineering, november 2015*. doi: 10.1007/s11204-015-9336-6.
- Özlu. V. & Orakoğlu Fırat, M.E. (2022). Donma-çözülme etkisi altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin Duncan-Chang modeli ile deneysel karşılaştırması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(4), 982-989.

- Özonur (Konuklu), Y. (2004). Düşük sıcaklıkta termal enerji depolamasına uygun faz değiştiren maddelerin mikrokapsüllenmesi (Yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Paudel, B. & Wang, B.L. (2010). Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine-grained soils from the Mackenzie valley, Canada. *Geo* 992-996.
- Pikul, J.L. & Allmaras, R.R. (1985). Hydraulic potential in unfrozen soil in response to diurnal freezing and thawing of the soil surface. *Transactions of the ASAE*, 28, 164-168.
- Pilehvar, S., Szczotok, A.M., Rodríguez, J.F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjøniksen, A.L. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Constr. Build. Mater.*, 200, 94–103.
- Pousette, K., Macsik, J., Jacobsson, A., Andersson, R. & Lahtinen, P. (1999). Peat soil samples stabilized in the laboratory-experiences from manufacturing and testing. In N. Taghizadieh (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization* (pp. 85–92). Balkema, Rotterdam.
- Proskin, S., Sego, D. & Alostaz, M. (2010). Freeze–thaw and consolidation tests on suncor mature fine tailings (MFT). *Cold Regions Science and Technology*, 63(3), 110-120.
- Rao, T., Liu, J., Chang, D. & Kravchenko, E. (2021). Effects of microencapsulated phase change material characteristics on the thermal performance and mechanical behaviour of silty clay. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100584>.
- Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., Alam, M. & Wilson, J. (2015). A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of pcm leakage in cementitious composites. *Appl. Energy*, 157, 85–94.
- Refaa, Z., Kakar, M.R., Stamatiou, A., Worlitschek, J., Partl, M.N. & Bueno, M. (2018). Numerical study on the effect of phase change materials on heat transfer in asphalt concrete. *International Journal of Thermal Sciences*, 133, 140–150.
- Ren, Y. & Hao, P. (2022). Modification mechanism and enhanced low-temperature performance of asphalt mixtures with graphene-modified phase-change microcapsules. *Construction and Building Materials*, 320, 126301.
- Russell, E.W. (1973). *Soil Conditions and Plant Growth* (10th ed.). 849. Longman.
- Qi, J. L. & Ma, W. (2006). Influence of freeze-thawing on strength of overconsolidated soils. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chin. J. Geotech. Eng.*, 28, 2082–2086.

- Qi, J. L. & Ma, W. (2010). State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils. *Rock Soil Mech*, 31, 133–43.
- Quirós, G. W., Little, R. L. & Garmon, S. (2000). A normalized soil parameter procedure for evaluating in-situ undrained shear strength. *Offshore Technology Conference, Houston, TX*.
- Sakulich, A.R. & Bentz, D.P. (2011). Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles. *J. Mater. Civ. Eng.*, 24(8), 1034–1042.
- Sarı, A. (2003). Thermal characteristics of a eutectic mixture of myristic and palmitic acids as phase change material for heating applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 1005-1017.
- Sarı, A., Alkan, C., Karaipekli, A. & Uzun, O. (2009). Microencapsulated n-octacosane as phase change material for thermal energy storage. *Sol Energy*, 83(10), 1757–63.
- Sarıgöl, H. A. (2021). Polimerlerle katkılı yüksek plastisiteli bir kilde donma-çözülme çevrimlerinin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Saydan, M., Unal, A., Keskin, U. S., & Kansun, G. (2020). An investigation of the current situation of the Mısırlıoğlu Bridge and possible damages after freeze-thaw by using finite elements analysis, Sille – Konya (Central Anatolia, Turkey). *Engineering Failure Analysis*, 117, 104788.
- Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S. & Haussmann, T. (2005). Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2–3), 297–306.
- Sevault, A., Kauko, H., Bugge, M., Banasiak, K., & Haugen, N. E. & Skreiberg, Ø. (2017). Phase change materials for thermal energy storage in low and high-temperature applications: a state of the art. *Research Gate*, 978-82-594-3684-9.
- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C. & Buddhi, D. (2007). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Science Direct*, 13, 318–345.
- Shen, G., Wang, X., Chan, A., Cao, F. & Yin, X. (2020). Investigation on optimal shell-totube radius ratio of a vertical shell-and-tube latent heat energy storage system. *Sol. Energy*, 211, 732–743.
- Shepeng, J. (2012). Research on asphalt mixture workability and construction quality control. Chang'an University, Xi'an.
- Si, W., Zhou, X.Y., Ma, B., Li, N., Ren, J.P., & Chang, Y.J. (2015). The mechanism of different thermoregulation types of composite shape-stabilized phase

- change materials used in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 98, 547–558.
- Sillanpaa, M. & Webber, L.R. (1961). The effect of freezing-thawing and wetting-drying cycles on soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 41, 182-187.
- Simonsen, E. & Isacsson, U. (2001). Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 863–875.
- Simonsen, E., Janoo, V.C. & Isacsson, U. (2002). Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *Journal of Cold Regions Engineering, ASCE*, 16, 28–50.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79(1), 7-31.
- Smith, L. B. (1972). Thaw consolidation tests on remolded clays. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Alberta, Edmonton.
- Soares, N. (2015). Thermal Energy Storage with Phase Materials (PCMs) for the Improvement Performance of Buildings (Doctoral Thesis). Columbia University, Institute of Science.
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R. & Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82-103.
- Socaciu, L. G. (2012). Thermal energy storage with phase change material. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, ISSN 1583-1078, 75-98.
- Soğancı, A.S. (2004). Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sönmez, K. (1994). Toprak koruma. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, 169, 192.
- Staricka, J.A. & Benoit, G.R. (1995). Freeze-drying effect on wet and dry aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 218–223.
- Stefan, L., Boulay, C., Torrenti, J.-M., Bissonnette, B. & Benboudjema, F. (2018). Influential factors in volume change measurements for cementitious materials at early ages and in isothermal conditions. *Cement Concrete Comp.*, 85, 105–121.
- Sterpi, D. (2015). Effect of freeze–thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy. *Soils and Foundations, Tokyo*. doi:10.1016/j.sandf.2015.09.030.

- Stoll, F., Drake, M.L. & I.O. Salyer, I.O. (1996). Use of phase change materials to prevent overnight freezing of bridge decks. *In IDEA Program, Trans. Res. Board*, 1–23.
- Şahin, U., Canbolat, M.Y. ve Anapali, O. (1999). DÇ koşullarının bazı toprak-su parametreleri üzerine etkisi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(1), 41-47.
- Tan, Ö., Olgun, M. ve Erkan, İ. H. (2012). Stabilize edilmiş şişen zeminlerin donma-çözülme etkisi altındaki davranışları. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim, SDÜ, Isparta*.
- Tan, Y.Q., Bian, X., Shan, L.Y., Le-Yong, Q.U. & Jian-Fu, L. (2013). Preparation and temperature regulation performance of latent heat materials for pavement. *Journal of Building Materials*, 16, 354–359.
- Tao, X. (2008). *Smart Fibres, Fabrics and Clothing*. Woodhead Publishing Limited, The Textile Institute, Cambridge, England.
- Tarefder, R.A. & Zaman, A.M. (2010). Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 714–725. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000072](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000072)
- Tester, R. E. & Gaskin, P. N. (1996). Effect of fines content on frost heave. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 678-680.
- Thevanayagam, S., Shenthana, T., Mohan, S. & Liang, J. (2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 128(10), 849–859.
- Timm, D.H., Voller, V.R., Lee, E.-B. & Harvey, J. (2001). Calcool: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 2(3), 169–185.
- Urgessa, G., Yun, K., Yeon, J. & Yeon, J.H. (2019). Thermal responses of concrete slabs containing microencapsulated low-transition temperature phase change materials exposed to realistic climate conditions. *Cem. Concr. Compos.*, 104, 103391.
- Utlü, Z., Aydın, D. & Kıncay, O. (2013). Yeşil Bina Uygulamalarında Gizli Isı Depolama Sistemlerinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17/20 Nisan, İzmir*, 1247-1259.
- Walker, R. D. & Karabulut, Ç. (1965). Effect of freezing and thawing on unconfined compressive strength of lime-stabilized soils. *Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization 43rd Annual Meeting*.
- Wang, F.Y. (2021). Preparation and application of polyethylene glycol PCM in asphalt. *New Chemical Materials*, 49, 269–372.

- Wang, J., Li, Y., Wang, Y., Yang, L., Kong, X. & Sundén, B. (2020). Experimental investigation of heat transfer performance of a heat pipe combined with thermal energy storage materials of CuO-paraffin nanocomposites. *Solar Energy*, 211, 928–937.
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X. & Wen, Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. *Cold Regions Science and Technology*, 48(1), 34-43.
- Wang, X., Liu, X., Zhao, Z., Chen, L., Yang, L., & Zhu. (2019). Experimental determination and thermodynamic modeling of solid–liquid-phase equilibrium for the 3-nitrotoluene and 4-nitrotoluene binary system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 1251–1257.
- Wang, X., Wu, Y., Shen, X., Wang, H., Liu, S. & Yan, C. (2018). An experimental study of a freeze-thaw damage model of natural pumice concrete. *Powder Technology*, 339, 651–658.
- Wang, X., Yang, P., Wang, H. & Dai, H. (2009). Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31, 1768-1772.
- Waqas, A., Ji, J., Ali, M. & Alvi, Z. (2018). Effectiveness of the phase change material-based thermal energy storage integrated with the conventional cooling systems of the buildings – A review. *Institution of Mechanical Engineers*, 0(0), 1-32.
- Wekumbura, C., Stastna, J. & Zanzotto, L. (2007). Destruction and recovery of internal structure in polymer-modified asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 227–232. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:3\(227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(227))
- Wei, K., Ma, B., & Duan, S.Y. (2019). Preparation and properties of bitumen-modified polyurethane solid-solid phase change materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, 04019139.
- Wischmeier, W.H. & D.D. Smith. (1978). Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation. Agricultural Handbook 537, Planning, Science and Education Administration. US Dep. of Agriculture, Washington, DC, USA, p.58.
- Wong, L. & Haug, M. (1991). Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liners and cover materials. In *Proceedings: 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, Drexel University, Philadelphia, PA*, pp. 580–593.
- Xiao, M., Feng, B. & Gong, K. (2002). Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity. *Energy Conversion and Management*, 43, 103-108.

- Xie, S., Qu, J., Lai, Y., Zhou, Z. & Xu, X. (2015). Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the qinghai-tibet plateau. *Journal of Mountain Science*, 12(4), 999-1099.
- Van Klaveren, R.W. (1987). Hydraulic erosion resistance of thawing soil. Ph.D. Dissertation, Department of Agricultural Engineering, Washington State University, Pullman, Washington.
- Van Wijk, W.R. & D.A. de Vries. (1963). Periodic temperature variations in a homogeneous soil. p. 102–143. In W.R. van Wijk (ed.) *Physics of plant environment*. North-Holland Publ.Co., Amsterdam, the Netherlands.
- Velraj, R., Seeniraj, B., Hafner, B., Faber, C. & Schwarzer, K. (1998). Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy*, 65, 171–180.
- Viklander, P. (1998). Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 471–477.
- Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B. R. & Mukherjee, R. V. (2009). Effect of polypropylene tape fibre reinforcement on swelling behaviour of an expansive soil. *Geosynthetics International*, 16(5), 393–401. doi:10.1680/gein.2009.16.5.393.
- Voorhees, W.B. (1983). Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 129-133.
- Yadav, M. R. & Saxena, G. S. (1973). Effect of compaction and moisture content on specific heat and thermal capacity of soils. *Journal Indian Society of Soil Science*, 21, 129–132.
- Yarbaşı, N. (2020). Doğal bir materyal olarak keçi kılı lifleriyle modifiye edilen kohezyonlu zeminlerin donma-çözülme direnci. *Araştırma Makalesi Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 157-166.
- Yeon, J.H. & Kim, K. (2018). Potential applications of phase change materials to mitigate freeze-thaw deteriorations in concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 177, 202–209.
- Yılmaz, F. (2018). Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma çözülmesine etkisinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(1), 56-61.
- Yıldız, M. ve Soğancı, A. S. (2012). Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays. *Sharif University of Technology*. doi:10.1016/j.scient.2012.06.003.
- Yılmaz, F. ve Demir, E. (2019). Freezing-thawing and wetting-drying behavior of clayey soil stabilized with lime and silica fume. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Journal of Science and Technology* 2019, 12(3), 1724-1732. doi: 10.18185/erzifbed.654104

- Yılmaz, F. ve Fidan, D. (2017). Effect of wetting-drying cycles on volumetric stability of clayey soil stabilized with lime and perlite. *European Journal of Technique*, 7(2).207-218.
- Yao, Y., Qi, J. & Song, C. (2008). Influence of freeze-thaw on engineering properties of Qingzang clay. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30, 165-169.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P. & Yin, C.W.P. (1985). Alteration of soil behavior after cyclic freezing and thawing. In: Kinosita, S., Fukuda, M. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, 5–7 August 1985, Sapporo, Japan. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp. 187–195.
- Yorulmaz, A. (2018). Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kil zemin mukavemetinin, donma-çözülme etkisi ve zamana bağlı olarak değişiminin cbr (california taşıma oranı) deneyleri ile değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Young, B.A., Falzone, G., She, Z., Thiele, A.M., Wei, Z., Neithalath, N., Sant, G. & Pilon, L. (2017). Early-age temperature evolutions in concrete pavements containing microencapsulated phase change materials. *Constr. Build. Mater.*, 147, 466–477.
- Zaimoğlu, R.K. & Akbulut. A.Ş. (2019). Effect of aspect ratio on the freezing-thawing of a ch clay. *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, 7(1), 66-74. ISSN: 2147-9364 (Electronic) doi: 10.15317/Scitech.2019.182
- Zalba, B., Marin, J., Cabeza, L. & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283.
- Zhang, D., Chen, M., Wu, S., Riara, M., Wan, J. & Li, Y. (2019). Thermal and rheological performance of asphalt binders modified with expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material. *Construction and Building Materials*, 194, 83–91.
- Zhang, Y., Li, D.Q. & Ming, F. (2016). Experimental study of the freezing front movement owing to freezing-thawing cycles. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38, 679–684.
- Zhang, P., Yang, Y., Wang, J., Hu, S., Jiao, M. & Ling, Y. (2020). Mechanical properties and durability of polypropylene and steel fiber-reinforced recycled aggregates concrete (FRRAC): A review. *Sustainability*, 12(22), 9509. <https://doi.org/10.3390/su12229509>.
- Zhang, Y. & Michalowski, R. L. (2015). Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement. *Journal of Geotechnical and*

- Zhang, M., Bi, J., Chen, W., Zhang, X. & Lu, J. (2018). Evaluation of calculation models for the thermal conductivity of soils. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 94 (2018) 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.005>.
- Zhao, H., Guo, J., Ma, S., Zhang, H., Su, C., Wang, X., Li, Z., Wei, J. & Cui, S. (2022). Effect of solid-solid phase change material's direct interaction on physical and rheological properties of asphalt. *Coatings*, 12(5).
- Zimmie, T.F. & La Plante, C. (1990). The effects of freeze/thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil. In: *Proceedings, 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Drexel Univ., Philadelphia, PA, pp. 580–593.
- Zou, Y.Z. & Boley, C. (2009). Compressibility of fine-grained soils subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Mining Science and Technology (China)*, 19(5), 631-635.
- Zorluer, İ. & Usta, M. (2003). Zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi. *Maden Mühendisleri Odası, Mersem 2003, Afyonkarahisar*.
- Zuo, X., Zhao, X., Li, J., Hu, Y., Yang, H. & Chen, D. (2020). Enhanced thermal conductivity of form-stable composite phase-change materials with graphite hybridizing expanded perlite/paraffin. *Sol. Energy*, 209, 85–95. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/Il-ve-Ilceler-Istatistik.aspx>(1 Temmuz 2023).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Gencdal, H.B. ve Kılıç, H. (2023). Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemelerin Donma Çözölmeye Maruz Kalan Dolgu Zeminin Mukavemet Davranışı Üzerindeki Etkileri. *9.Geoteknik Sempozyumu*, 22-24 Kasım, İstanbul. DOI: 10.5505/2023geoteknik.SS-80.
2. Gencdal, H.B., Mert, A.C. ve Kılıç, H. (2024). Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzeme Katkılı Zeminlerin Donma Çözölmeye Etkisi Altında Davranışının Sayısal Analizi. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı ve 3. Genç Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu*, 16-18 Ekim, Ankara.

Makaleler

1. Gencdal, H.B. ve Kılıç, H. (2023). Effects of Microencapsulated Phase Change Material on the Behavior of Silty Soil Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Sustainability (Switzerland)*, 15,15, SCI-Expanded, 10.3390/su151512005.

Projeler

1. Kılıç, H., Özçoban, M.Ş ve Gençdal, H.B. (2022). Donma Çözölmeye Zeminin Sıkışabilirlikve Geçirimlilik Özelliklerine Faz Değiştirme Malzemesinin Etkileri. *Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje-Genel Araştırma Projesi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, FBA-2022-5048, 05.2022- 06.2023.
2. Kılıç, H. ve Gençdal, H.B. (2023). Mikrokapsüllenmiş Faz Değişim Malzemesinin Donma-Çözölmeye Çevrimlerine Maruz Kalan Siltli Zeminin Mikro-Yapısı Üzerindeki Etkileri. *Tubitak 1002-Hızlı Destek Programı, 1002-B Acil Destek Modülü*, 223M014, 10.2023-06.2024.
3. Seçkin, E., Kılıç, H. ve Gençdal, H.B. (2022). Faz Değiştirme Malzemesinin Dolgu Zeminlerde Kullanımının Donma Çözölmeye Davranışına Etkileri. *İstanbul Kültür Üniversitesi*, İKÜ-BAP2206, 06.2022-05.2023.