

MİKROKAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN DONMA ÇÖZÜLMEME MARUZ KALAN DOLGU ZEMİNİN SIKIŞABİLİRLİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

EFFECTS OF MICROENCAPSULATED PHASE CHANGE MATERIALS ON THE COMPRESSIBILITY BEHAVIOR OF FREEZE-THAWED FILL SOILS

Hazal Berrak GENÇDAL¹, Hawvanur KILIÇ²

ÖZET

Soğuk iklim bölgelerinde inşa edilen toprak dolguların donma çözülme çevrimlerine (DÇ) maruz kalması halinde, zeminin mukavemet ve sıkışabilirlik özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli bir siltli kil zeminin soğuk bölgelerde yol dolgusu olarak kullanılması durumunda, yapının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı DÇ çevrimleri etkisinde sıkışabilirliğinde meydana gelecek değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada zemin içine farklı oranlarda mikrokapsüllü faz değişim malzemesi (mFDM) eklenerek zeminin sıcaklık performansı iyileştirilmiştir. %5, %8 ve %10 oranlarında zemin içine katılan mFDM ile homojen bir karışım elde edilmiş, elde edilen mFDM-zemin karışımından alınan deney numuneleri farklı donma çözülme çevrimlerine (1, 3, 5, 7, 9, 11) maruz bırakılmış ve sıkışabilirlik davranışı tek boyutlu ödometre deneyleri ile incelenmiştir. Standart kompaksiyon enerjisi ile belirlenen optimum su muhtevası değerlerinde hazırlanan ve farklı DÇ çevrimlerine maruz kalan mFDM katkılı zemin üzerinde yapılan deneyler ile mFDM'nin zeminin sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. mFDM katkısının zeminin oturmasını (ΔH) arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, artan DÇ çevrim sayısı ile zeminin oturması sabit tutulmuştur. Ayrıca, mFDM katkı maddesi içeriğindeki artış, zeminin oturmasını azaltmaya yönelik bir davranış sergilemiştir. Zeminin oturma miktarı için, %10 mFDM ilavesinin DÇ çevrimlerinden en az etkilenen katkı oranı olduğu belirlenmiş, böylece %10 mFDM'in en iyi iyileşmeyi sağladığı tespit edilmiştir. *Anahtar Kelimeler: Mikrokapsüllü faz değiştirilen malzeme, sıkışabilirlik, donma çözülme çevrimi.*

ABSTRACT

In cold climate regions, if the soil embankments are exposed to freeze thaw cycles (FT), the strength and compressibility properties of the soil are negatively affected. In this context, in case of using a highly plastic silty clay soil as a road fill in cold regions, the changes in the compressibility of the structure under the effect of the FT cycles it will be exposed to

¹ Dr., İstanbul Kültür Üniversitesi, h.gencdal@ik.edu.tr (sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr

throughout its service life were investigated experimentally. In the study, the temperature performance of the soil was improved by adding different amounts of microencapsulated phase change material (mFDM) into the soil. A homogeneous mixture was obtained with mFDM added to the soil at 5%, 8% and 10% ratios, the test samples taken from the obtained mFDM-soil mixture were exposed to different freeze-thaw cycles (1, 3, 5, 7, 9, 11) and the compressibility behavior was investigated with one-dimensional oedometer tests. The effects of mFDM on the compressibility behavior of the soil were determined by experiments conducted on mFDM added soil prepared at optimum water content values determined by standard compaction energy and subjected to different FT cycles. It was observed that mFDM additive increased the soil settlement (ΔH). However, the soil settlement was kept constant with increasing FT cycle number. In addition, the increase in mFDM additive content exhibited a behavior towards reducing the settlement of the soil. For the amount of soil settlement, it was determined that 10% mFDM addition was the least affected contribution rate by FT cycles, thus 10% mFDM provided the best improvement.

Keywords: Microencapsulated phase change material, compressibility, freeze thaw cycle.

1. GİRİŞ

Mevsimsel olarak donma çözölmelerin (DÇ) meydana geldiği bölgelerde yer alan zeminler, mikro ve makro yapıda hasar görmektedir. Donma çözölmeye çevrimleri zeminin yapısında bozulmalara neden olarak, fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişimler meydana getirmektedir. Meydana gelen bu değişimler iklim şartlarına, zemin türüne (dane dağılımı, mineralojik yapı) ve özelliklerine, ortamdaki su miktarına, sürşarj yükü ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır (Işık, 2014).

Yapılan literatür çalışmalarında, özellikle soğuk iklim bölgelerinde yer alan yüksek plastisiteli zeminlerde (CH ve MH) dış ortam sıcaklığındaki değişiklikler ve çevresel faktörlerin zemin yapısında tahribat meydana getirdiği, bu zeminlerin suya maruz kaldıklarında şişme, kuruduklarında ise büzölme davranışı göstererek yüksek hacim değişimlerine maruz kaldıkları gözlemlenmiştir (Gencdal vd., 2019). Bu karakteristik özellikleri sebebi ile özellikle soğuk bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli zeminlerin mühendislik uygulamalarında iyileştirilmeden kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır (Murthy vd., 2006; Viswanadham vd., 2009; Qi vd., 2010). DÇ çevrimi etkisinde kalan bu zeminlerin hacimlerinde meydana gelen değişimler sonunda, dane yapısında bozulma (Ozgan vd. (2012), mukavemetinde kayıp (Li vd. 2012), oturma ve hidrolik iletkenliğinde artış (Ozgan vd., 2015; Chamberlain vd. (1979) meydana gelir. Bu durum da dolgunun stabilitesini bozarak mühendislik yapısı için tehlike arz eder (Chaduvula vd., 2017; Çiftliklioğlu vd., (2018); Ferber vd., 2009). Bu nedenle, bu tip zeminlerin toprak dolgu inşasında kullanılması durumunda, DÇ çevrimlerine maruz kalmaları dikkate alınarak hacim değişimi (şişme veya oturma) davranışları ayrıntılı olarak incelenmeli ve tasarımda bu bilgilerden yararlanılmalıdır (Chaduvula vd., 2017). Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, meydana gelen bu olumsuz sonuçların iyileştirilebilmesi amacıyla yapılan iyileştirme çalışmalarında uçucu kül, kireç ve çimento gibi tipik kimyasal stabilizatörler kullanılmıştır (Yılmaz, 2018). Ancak, bu malzemelerle yapılan iyileştirmenin yeterli sonuçlar vermediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, zeminin DÇ performansını

iyileştirmek için geleneksel yöntemlerden farklı ve etkili bir alternatif belirlenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

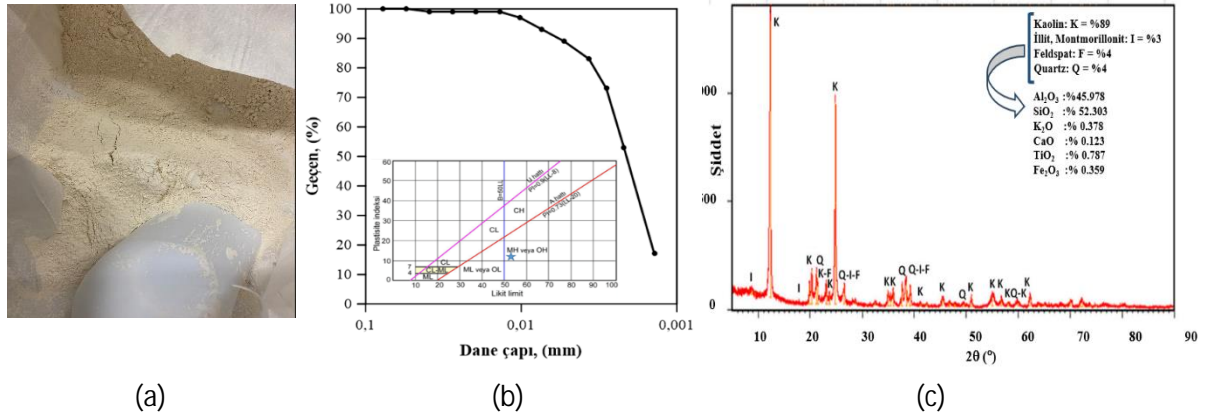
Bu kapsamda, bu çalışmada “faz değiştiren malzeme (FDM)” olarak adlandırılan, belirli sıcaklık altında faz değiştirebilen ve bu faz değiştirme sırasında büyük miktarda ısıyı gizli ısı şeklinde depolayan ve serbest bırakan kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır (Chen vd., 2021). FDM’ler kimya, tekstil, gıda, sağlık gibi çok farklı sektörlerde kullanılan ve organik, inorganik, ötektik olmak üzere üç ana başlıkta sınıflandırılan termal özelliği bulunan malzemelerdir (Acar, 2014). Kullanım alanları ve kullanım amaçlarına göre FDM’ler termal, kinetik, kimyasal, çevresel, ekonomik faktörlere göre seçilmektedirler. FDM’lerin termal özellikleri sebebi ile çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılması, inşaat yapı malzemelerinde de kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu amaçla yapılan beton (Farnam vd. (2016)) ve asfalt (Chen vd. (2012)) üzerindeki çalışmalar, FDM’nin yapı malzemesinin sıcaklık performansını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Elde edilen bu olumlu bulgular FDM’nin zeminde de kullanılabilirliği konusunda öncülük etmiştir. Bu veriler doğrultusunda, zeminin DÇ performansını iyileştirmek için çalışmalarda FDM kullanılmıştır (Chen vd., 2021; Farnam vd., 2016; Rao vd., 2021; Mahedi vd., 2019).

Organik, inorganik ve ötektik grubundaki FDM’ler avantaj ve dezavantaj bakımından değerlendirildiğinde, organik FDM’lerin diğer FDM’lere göre daha avantajlı olduğu görülmüş, bu sebeple bu çalışmada çevre dostu, aşındırıcı özelliği olmayan, kimyasal kararlılığı ve uygun maliyetli, oda sıcaklığında likit halde bulunan parafin bazlı organik FDM tercih edilmiştir (Crespoa vd., 2018).

DÇ çevrimlerinin olumsuz etkilerinin gözlemlenebilmesi ve iyileştirilebilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, DÇ çevrimlerine maruz kalan yüksek plastisiteli killi silt bir zeminin (MH) oturma davranışında mFDM katkısının etkileri incelenmiştir. Zemine %5, %8 ve %10 mFDM ilave edilerek standart kompaksiyon enerjisi ile hazırlanan numuneler, 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 DÇ çevrimlerine tabi tutulmuştur. DÇ çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde tek boyutlu ödometre deneyleri yapılmış, mFDM katkılı ve mFDM katkısız deney sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

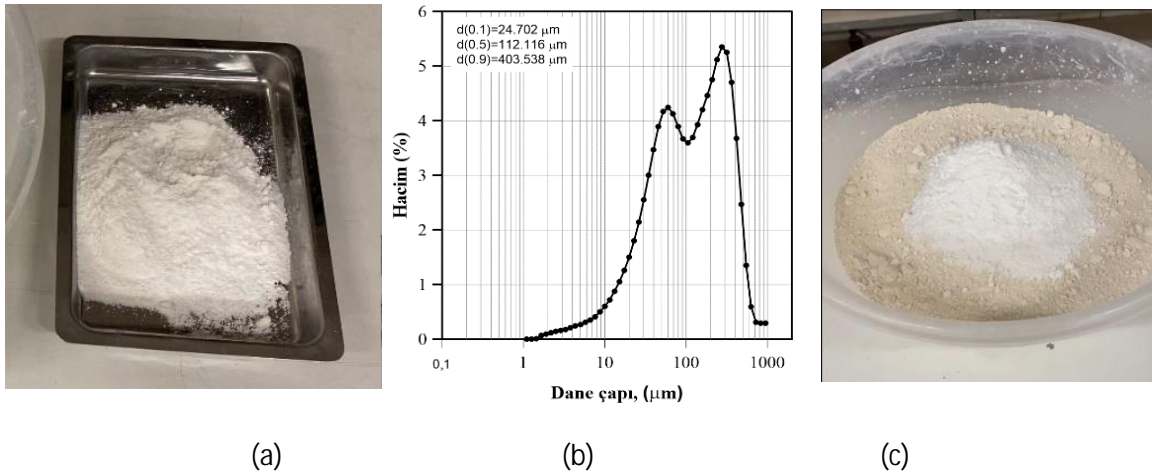
2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, mFDM katkısının zeminin sıkışma özelliklerine etkisini araştırmak için Kocaeli, Türkiye mevkiinden tedarik edilen yüksek plastisiteli ve donmaya karşı hassas olduğu bilinen, kaolen minerali yüksek olan beyaz-krem renkli killi silt bir zemin kullanılmıştır (Şekil 1a). Deneysel çalışmada kullanılan zemin üzerinde yapılan elek ve hidrometre analizi (ASTM D6913 ve ASTM D7928), Atterberg limitleri (ASTM D4318) deneyleri ile zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)’ne göre yüksek plastisiteli killi silt (MH) olarak belirlenmiştir (Şekil 1b). Ayrıca, zeminin mineralojik yapısının tespiti için yaptırılan XRD ve XRF analizlerinde, zeminde kaolen (%89), kuvars (%4), feldspat (%4) ve illit-montmorillonit (%3) mineralleri görülmüştür (Şekil 1c).



Şekil 1a. Çalışmada kullanılan zemin, Şekil 1b. Zemine ait dane çapı dağılım eğrisi, Şekil 1c. XRD ve XRF analiz verileri

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak, tahriş edici olmayan, kokusuz, çekirdek malzemesi parafin olan, uygulanan donma (-20°C) ve çözölmeye (+20°C) sınır şartları arasında faz değiştirme özelliği gösteren beyaz renkli bir mFDM kullanılmıştır (Şekil 2a). Likit halde temin edilen FDM'nin çalışmalardaki olumsuz sonuçları sebebi ile doğrudan kullanılmaması gerektiği belirtilmiş, bu sebeple, FDM Kimya Laboratuvarı'nda bir kabuk malzeme ile kaplanarak mikrokapsüllenmiştir (mFDM) (Rao vd., 2021; Mahedi vd., 2019; Chen vd., 2021). mFDM üzerinde yapılan dane boyutu analiz sonuçlarına göre malzemenin %10'unun 0.02 mm'nin, %90'unun 0.4 mm altında olduğu belirlenmiştir (Şekil 2b). mFDM boyutunun küçük ve zeminin dane boyutuna yakın oluşu, mikrokapsüllerin zemin ile homojen olarak karışmasında önemli rol oynamıştır. Zemin (MH) ve mFDM'nin bir aradaki görüntüleri Şekil 2c'de sunulmuştur.



Şekil 2a. Çalışmada kullanılan mFDM, Şekil 2b. mFDM'ye ait dane çapı dağılım eğrisi
Şekil 2c. Çalışmada kullanılan mFDM ve zemin

mFDM'nin bu çalışmada tercih edilmesinin en önemli sebebi olan termal özelliğinin (faz değiştirdiği sınır sıcaklık değerleri) belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analiz sonuçlarına göre, mFDM'nin aktif olduğu sıcaklık aralıkları endotermik reaksiyon için 1.1 ile 9.2°C arasında, ekzotermik reaksiyon için ise -3.6 ile 3.3°C arasındadır. Uygulanan donma çözölmeye çevrim sınır sıcaklık değerleri arasında mFDM, DSC analizleri ile belirlenen bu sıcaklık değerleri arasında aktif faz değiştirerek ortamdaki sıcaklık

dalgalanmasını azaltmaktadır. Bu sayede, DÇ çevrimleri boyunca sıcaklık değişimini minimize ederek zemin davranışının daha az hasar ile atlatılmasına yardımcı olmaktadır.

mFDM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan MH zeminin sıkışma (oturma) davranışına etkilerinin incelenebilmesi için, tek boyutlu ödometre deneyleri yapılmıştır. No. 200 elekten geçen zemin numunesi, 105 °C'de etüvde 24 saat bekletilmiş, etüvden alındıktan sonra sıcaklığını kaybetmesi için beklenmiş ve optimum su muhtevasında distile su eklenerek 24 saat kür uygulanmıştır (sızdırmaz poşet, alüminyum folyo, strech film ve desikatör). Kuru zemin ağırlığının %5, %8, 10%'u kadar mFDM zemin ile karıştırılarak, mFDM katkısının kuru zemin içinde homojen olarak dağılımı sağlanmıştır. Her bir katkı oranı için standart kompaksiyon deneyleri yapılmış (ASTM D1557), optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Yapılan kompaksiyon deneylerinde; katkısız, %5, %8 ve %10 mFDM katkılı zeminin optimum su muhtevası değerleri sırasıyla %35, %39, %39 ve %40 olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Tüm katkı oranları için belirlenen optimum su muhtevası değerlerinde, zemin-mFDM karışımına distile su eklenerek 15 dk karıştırılmış ve tüm dane yüzeylerinin tekdüze olması sağlanmıştır. Bu ön-hazırlama işleminden sonra zemin karışımları standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmıştır.

Tek boyutlu ödometre deneyleri için, standart kompaksiyon enerjisi ile optimum su muhtevasında kompakte edilerek hazırlanan numuneden 5cm çap ve 2cm yüksekliğinde deney numuneleri alınmıştır (Şekil 4). Deney numuneleri su muhtevasını kaybetmemesi için strech filme sarılmış ve ilgili donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmak üzere donma çözülme kabine (-20 °C ve +20 °C) yerleştirilmiştir (Şekil 5). Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda da uygulandığı üzere, -20°C'de 24 saat bekletilen numuneler donma sürecini, +20°C'de 24 saat bekletilen numuneler çözülme sürecini tamamlayarak, 1 donma çözülme çevrimi 48 saatte tamamlanmıştır (Şekil 6) (Çiftliklioğlu, 2018; Mahedi vd., 2019).

Numuneler aynı yöntemle mFDM (%0 PCM) eklenmeden ve (%5, 8, 10 mFDM) eklenerek hazırlanmıştır. Katkısız (%0 mFDM) ve katkılı (%5, %8, %10) deney numunelerinde ilgili donma çözülme çevrimleri (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11) uygulanarak ASTM D2435 yönetmeliğine göre tek boyutlu ödometre deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3. Kompaksiyon verileri, Şekil 4. Tek boyutlu ödometre deney numunesi, Şekil 6. DÇ kabini, Şekil 6. DÇ uygulanma koşulları

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Açıklanan prosedüre göre hazırlanan katkısız (%0 mFDM) ve katkılı (5, 8 ve %10 mFDM) deney numunelerinde donma çözülme çevrimi uygulanmadan tek boyutlu ödometre

deneyleri yapılmıştır. Bu deney verileri referans değerleri temsil etmiştir. Aynı prosedürde hazırlanan katkısız ve katkılı deney numunelerine 1, 3, 5, 7, 9, ve 11 donma çözölmeye çevrimi uygulanmış ve ardından numuneler üzerinde yapılan deneyler, referans deneyler ile karşılaştırılmıştır.

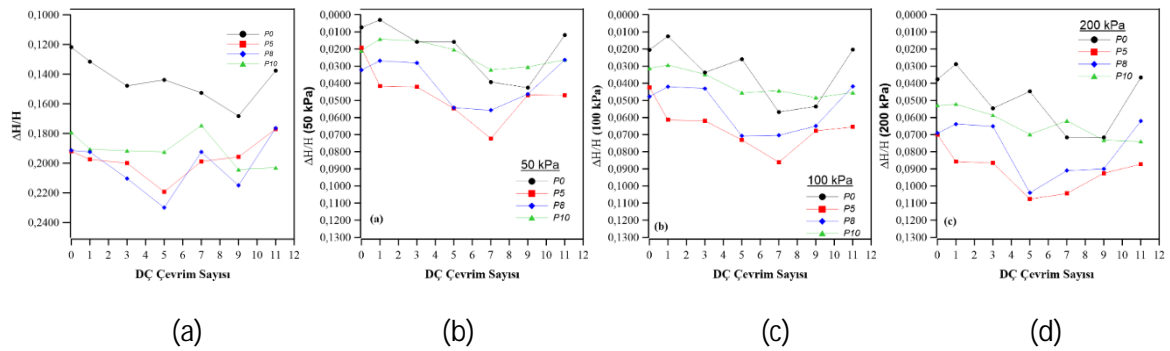
Tek boyutlu ödometre deneylerine tabi tutulan katkılı ve katkısız deney numunelerine sırasıyla 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa ve 1600 kPa gerilme adımlarında yükleme yapılmıştır. Deneylerde her bir yük adımında 24 saat beklenerek, diğer yük adımına geçilmiştir. Böylece, donma çözölmeye çevrimlerine maruz kalan/kalmayan katkılı ve katkısız zeminin yük altındaki oturma davranışı belirlenmiştir. Numuneler üzerinde yapılan tek boyutlu ödometre deneyleri Tablo 1'deki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 1. Tek boyutlu ödometre deney numunelerinin isimlendirilmesi

mFDM oranı (%)	Donma Çözölmeye Çevrim Sayısı						
	0	1	3	5	7	9	11
0	P0-0	P0-1	P0-3	P0-5	P0-7	P0-9	P0-11
5	P5-0	P5-1	P5-3	P5-5	P5-7	P5-9	P5-11
8	P8-0	P8-1	P8-3	P8-5	P8-7	P8-9	P8-11
10	P10-0	P10-1	P10-3	P10-5	P10-7	P10-9	P10-11

Tablo 1'de yapılan isimlendirmede, ilk terim zemine katılan mFDM oranını, ikinci terim ise DÇ çevrim sayısını temsil etmektedir. Buna göre "P10-3", %10 mFDM katkılı deney numunesinin 3 donma çözölmeye çevrimine maruz kaldığını ifade etmektedir. Deney numuneleri üzerinde ilgili DÇ çevrimleri tamamlandıktan sonra sıkışma deneyleri yapılmıştır.

Tablo 1'de isimlendirilmesi verilen deney numuneleri üzerinde tek boyutlu ödometre deneyleri gerçekleştirilmiş, deneyler sonunda elde edilen oturma ($\Delta H/H$) ile uygulanan donma çözölmeye çevrim sayısı arasındaki ilişki 1600 kPa, 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa nihai gerilme adımları için sırasıyla, Şekil 7a, Şekil 7b, Şekil 7c ve Şekil 7d'de sunulmuştur.



Şekil 7. $\Delta H/H$ -DÇ ilişkisi a) 1600 kPa, b) 50 kPa, c) 100 kPa d) 200 kPa

Şekil 7a'da görüldüğü üzere katkısız zeminin oturması DÇ çevrimlerinden önemli ölçüde etkilenmiş ve artmıştır. Şekil 7a'da DÇ çevrimlerinin bu olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması için zemine katılan mFDM katkısının oturmaları etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. 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.

Şekil 7a'da, 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. Her bir 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.

Şekil 7b, Şekil 7c ve Şekil 7d'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 ise, 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 daha fazla 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 (Gençdal ve Kılıç, 2023).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, soğuk bölgelerde yer alan ve donma çözülme çevrimlerine maruz kalan bir zeminin, değişen sıcaklıklar altındaki davranışında, mFDM'nin performansı araştırılmıştır. Bu amaçla, çekirdek malzemesi parafin olan kapsüllenmiş bir mFDM ile donmaya karşı duyarlı yüksek kaolen içeriği olan yüksek plastisiteli killi silt (MH) zemin kullanılmıştır. mFDM'nin, MH zemine farklı oranlarda (%5, %8, %10,) ilave edilmesi ile dolgu zemininin farklı donma çözülme çevrimlerine (1, 3, 5, 7, 9, 11) maruz kalması durumunda göstereceği mukavemet davranışı incelenmiştir.

- Dane boyu analizlerinde, mFDM ve zeminin dane boyutlarının birbirine yakın olduğu, bu sayede mFDM ve zeminin homojen olarak karıştığı belirlenmiştir.
- Kompaksiyon deney verilerinden, mFDM ilavesinin zeminin kuru birim hacim ağırlık değerinde azalmaya, optimum su muhtevasında artışa sebep olduğu görülmüştür.
- Yapılan tek boyutlu ödometre deneyleri ile artan DÇ çevrimlerinin, katkısız zeminin oturmasını arttırdığı belirlenmiştir. Bunun yanında, mFDM katkısının zeminin mekanik

davranışını etkilediği, mFDM katkı oranı ile DÇ çevrim sayısı arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. mFDM'nin, katkısız zeminin oturmasında artışa neden olduğu, ancak artan DÇ çevrimlerinde oturmanın özellikle düşük konsolidasyon gerilmelerinde sabit kaldığı görölmüştür. Artan mFDM oranı ile oturmada azalma sağlanmış ve özellikle %10 katkı oranının, donma çözölmeye çevrimleri boyunca (-20°C ile +20°C), oturma davranışı için en uygun oran olduğu belirlenmiştir.

- Yapılan bu çalışmalar, mFDM katkılı zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden davranışı sabit tutulabildiğini göstermektedir. Böylece, ısı verme-alma özelliği ile mFDM'nin zemin içine katılmasının DÇ çevrimlerinde meydana gelen olumsuz değişimleri etkili bir biçimde azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, mFDM ile yapılacak olan zemin uygulamalarında mutlaka, mFDM'nin türü, zeminle uyumluluğu, kimyasal kararlılığı, termal özellikleri, çevre koruyuculuğu ve bölgesel iklim koşulları ile proje hedef sıcaklığı dikkate alınmalıdır.

TEŐEKKÜR

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2022-5048 ve İstanbul Kültür Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP-2206 numaralı projeler ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Acar, S.S. (2014), "Faz Değiştirici Maddeler Ve Uygulamaları". Fırat Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi.
- ASTM D6913. (2004), "Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis." ASTM Int. West Conshohocken, PA, 04, 1–35.
- ASTM D7928-17. (2017), "Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis". ASTM Int. 1–25.
- ASTM D4318-00. (2000), "Standards,for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils This c of Soils" ASTM Int. 04, 1–14.
- ASTM D1557. (2003), "International Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using." ASTM Stand. Guid. 3, 1–10.
- ASTM 2435. (2014), "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading."
- 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. ve Gow, A. (1979), "Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils". Engineering Geology 13: 73–92.
- Chen vd. (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>.
- Ciftliklioğlu, K. (2018), "Donma-Çözölmeye Çevrimlerinin Uçucu Kül ve Kireç Katkılı Killerin Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışına Etkisi" İstanbul Teknik Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Crespoa, A., Barrenechec, C., Ibarraa, M. ve Platzera, W. (2018), "Latent Thermalenergy Storage For Solar Process Heat Applications At Medium High Temperatures"– A review. Science Direct, 4860.
- Chen, M., Wan, L., Lin, J. (2012), "Effect of Phase-Change Materials on Thermal and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures". J. Test. Eval. 40 (2012) 20120091, <https://doi.org/10.1520/JTE20120091>.
- Farnam, Y., Krafcik, M., Liston, L., Washington, T., Erk, K., Tao, B. ve Weiss, J. (2016), "Evaluating The Use of Phase Change Materials in Concrete Pavement to Melt Ice And Snow". Journal of Materials in Civil Engineering, 28(4), 04015161. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001439.
- 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.
- Gencdal, 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
- 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.
- Işık, A. (2014), "Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözölme Olayının Deneysel İncelenmesi". İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Li, G., Wei, M., Zhao, S. ve Mao, Y. (2012), "Effect of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Behavior of Compacted Fine-Grained Soil". August 2012, DOI: 10.1061/9780784412473.008.
- Mahedi, M., Cetin, B., Cetin, K.S. (2019), "Freeze-Thaw Performance of Phase Change Material (PCM) Incorporated Pavement Subgrade Soil". Constr Build Mater 2019;202:449–64.
- 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.
- Ozgan, E., Ertürk, S. ve Serin, S. (2012), "Donma ve Çözölmenin Kohezyonlu Zeminlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi". İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Cilt 1, No 1, 7-16.
- Ozgan, E., Serin, S. ve Vural, I. (2015), "Effects of Freezing and Thawing on the Consolidation Settlement of Soils". Soil Mechanics and Foundation Engineering. DOI: 10.1007/s11204-015-9336-6.
- Qi JL, Ma W. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils. Rock Soil Mech 2010;31:133–43.
- Rao vd. (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>.
- 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.

Yılmaz, F. (2018), "Uçucu Kül ve Mermer Tozu Katkılarının Zeminin Stabilizasyonuna ve Donma özölmesine Etkisinin Araştırılması". Academic Platform Journal of Engineering and Science 8-1, 56-61. Doi: 10.21541/apjes.488373.