

MİKROKAPSÜLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN DONMA ÇÖZÜLMEME MARUZ KALAN DOLGU ZEMİNİN MUKAVEMET DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

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

Hazal Berrak GENÇDAL¹, Havvanur KILIÇ²

ÖZET

Soğuk iklim bölgelerinde inşa edilen toprak dolgular donma çözülme çevrimlerine (DÇ) maruz kaldığında, zeminin mukavemet ve sıkışabilirlik özellikleri etkilenmektedir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli bir siltli kil zeminin yol dolgusu inşasında kullanılması durumunda, yapının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı donma çözülme çevrimleri etkisinde mukavemetinde meydana gelecek değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada zemin içine mikrokapsüllü faz değişim malzemesi (mPCM) eklenmiş ve zeminin sıcaklık dalgalanmasını azaltmaya yardımcı olan ısı depolama kapasitesi artırılmıştır. mPCM farklı oranlarda (%5, %8 ve %10) zemin içine katılarak hazırlanan deney numuneleri, farklı donma çözülme çevrimlerine (1, 3, 5, 7, 9, 11) maruz bırakılarak mPCM'in zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak optimum su muhtevasında kompakte edilerek hazırlanan numuneler, donma çözülme çevrimlerine maruz bırakılmış, mukavemet davranışı için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. mPCM katkılı zemin üzerinde yapılan deneyler ile mPCM'in zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. mPCM katkısının zeminin serbest basınç mukavemetini (q_u) azalttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, artan DÇ sayısı ile zeminin mukavemeti sabit tutulmuştur. Ayrıca, mPCM katkı maddesi içeriğindeki artış, zeminin mukavemetini arttırmıştır. Serbest basınç mukavemeti için, %10 mPCM ilavesinin donma çözülme çevrimlerinden en az etkilenen katkı oranı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrokapsüllü faz değiştirilen malzeme, serbest basınç mukavemeti, donma çözülme çevrimi.

ABSTRACT

When soil fills built in cold climates are exposed to freeze-thaw cycles (FT), the strength and compressibility properties of the soil are affected. In this context, if a high plasticity silty clay soil is used in the construction of road embankment fill, the changes that will occur in the strength of the structure under the influence of freeze-thaw cycles during its service life have been experimentally investigated. In the study, microencapsulated phase change material (mPCM) was added to the soil, and the heat storage capacity of the soil was increased, which helped to reduce the temperature fluctuation. The effects of mPCM on the strength behavior of the soil were investigated by exposing the test samples prepared by adding mPCM material in different ratios (5%, 8%, and 10%) into the soil to different freeze-thaw cycles (1, 3, 5, 7, 9, 11). For this purpose, samples prepared by compacting at optimum water content using standard compaction energy were exposed to freeze-thaw cycles, and unconfined pressure tests were carried out for strength behavior. The effects of mPCM on the strength behavior of the soil were determined by the experiments performed on the mPCM-added soil. It has been observed that the mPCM additive reduces the unconfined compressive strength (q_u) of the soil. However, the strength of the soil was kept constant with the increasing number of FT. In addition, the increase in the mPCM additive content increased the strength of the soil. For

¹ Yük.İnş.Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi, berrak.gencdal@std.yildiz.edu.tr (sorumlu yazar)

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

unconfined compressive strength, 10% mPCM addition was determined to be the least affected additive ratio from freeze-thaw cycles.

Keywords: *Microencapsulated phase change material, unconfined compressive strength, freeze-thaw cycle.*

1. GİRİŐ

Mevsimsel olarak donma ve çözölmelerin meydana geldiği bölgelerde yer alan zeminler, mikro ve makro yapıda hasar görmektedir. Donma-çözölme 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 bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli zeminlerin mühendislik uygulamalarında iyileştirilmeden kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır (Viswanadham vd., 2009). Çünkü, donma çözölme çevrimlerine maruz kalan zeminlerde dane yapısının bozulduğu (Ozgan vd. (2012), mukavemetin azaldığı (Li vd. (2012)), sıkışabilirlik (Ozgan vd. (2015)) ve hidrolik iletkenliğin (Chamberlain vd. (1979)) arttığı, sıcaklık değişimleri nedeni ile dolgu stabilitesinin bozulduğu (Çiftliklioğlu (2018)) yapılan literatür çalışmaları ile ortaya konulmuştur. Bu amaçla, 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 donma-çözölme performansını iyileştirmek için geleneksel yöntemlerden farklı ve etkili bir alternatif belirlenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Bu çalışmada “faz değiştiren malzeme (FDM-PCM)” 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). Faz değiştiren malzemeler, kimya, havacılık, askeriye, tekstil, inşaat malzemeleri, otomotiv, gıda vb. çok geniş alanlarda yaygın olarak kullanılan termal arayüzlü malzemelerdir (Acar, 2014). Son yıllarda beton (Farnam vd. (2016)) ve asfalt (Chen vd. (2012)) üzerinde yapılan çalışmalar sonunda PCM’in zeminde kullanılabilirliği konusunda umut verici bulgular elde edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, zeminin donma çözölme performansını iyileştirmek için çalışmalarda PCM kullanılmıştır (Chen vd., 2021; Farnam vd., 2016; Rao vd., 2021; Mahedi vd., 2019).

PCM’ler organik, inorganik ve kompozit olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. PCM seçiminde, çalışma sıcaklık aralığı (termal özellik), kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. PCM çeşitleri birbiri ile kıyaslandığında, organik PCM’ler diğer PCM’lere göre daha avantajlıdır (Crespoa vd., 2018). Bu amaçla bu çalışma için, çevre dostu, aşındırıcı özelliği olmayan, kimyasal kararlılığı ve uygun maliyetli, oda sıcaklığında likit halde bulunan parafin bazlı organik PCM tercih edilmiştir.

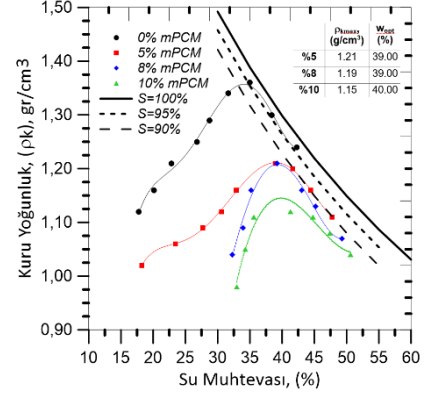
Bu çalışmada, donma-çözölme çevrimlerine maruz kalan yüksek plastisiteli killi silt bir zeminin mukavemet davranışında mPCM katkısının etkileri incelenmiştir. Sınıflandırma deneyleri yapılmış, standart ve modifiye kompaksiyon deneyleri ile kullanılacak enerji seviyesine karar verilmiştir. Zemine %5, %8 ve %10 mPCM ilave edilerek standart kompaksiyon enerjisi ile hazırlanan numuneler, 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 donma-çözölme çevrimlerine tabi tutulmuştur. Donma-çözölme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde serbest basınç deneyleri yapılmış, mPCM katkılı ve mPCM katkısız deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, mPCM katkısının zeminin mukavemet 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. 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 (Tablo 1). Standart ve modifiye kompaksiyon (ASTM D1557) deneyleri ile optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkisi incelenmiştir (Şekil 1). Ayrıca, zeminin mineralojik yapısının tespiti için yaptırılan XRD ve XRF analizlerinde, zeminde kaolen (%89), kuvars (%4), feldspat (%4) ve illit-montmorillonit (%3) mineralleri görölmüştür.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan zemin özellikleri

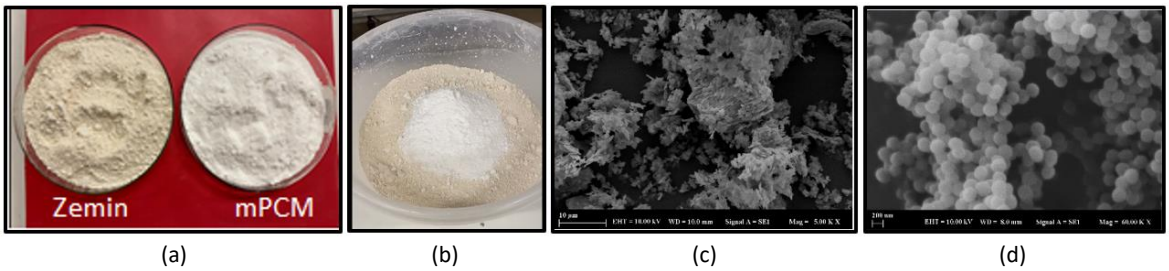
Özellik	Değer
Silt, (%)	55.00
Kil, (%)	45.00
Özgül Ağırlık, G _s	2.65
Likit Limit, w _L	54.00
Plastik Limit, w _P	38.00
$\rho_{kmax-standard}$, (g/cm ³)	1.36
w _{opt-standard} , (%)	34.80
$\rho_{kmax-modified}$, (g/cm ³)	1.41
w _{opt-modified} , (%)	31.00



Şekil 1. Kompaksiyon deney verileri

MH zeminin, standart kompaksiyon enerjisine göre optimum su muhtevası %34.80, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.36 g/cm³, modifiye kompaksiyon enerjisine göre optimum su muhtevası %31.00, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.41 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

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



Şekil 2. Zemin (MH) ve mPCM görselleri, Zemin (MH) ve mPCM SEM analiz sonuçları
a) MH ve mPCM (ayrı şekilde), b) MH ve mPCM (bir arada), c) MH-SEM, d) mPCM-SEM

mPCM'in termal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaptırılan DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analiz sonuçlarına göre, mPCM'in 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.

mPCM'nin, donma çözülme çevrimlerine maruz kalan MH zeminin mukavemet davranışına etkilerinin incelenmesi için, serbest basınç 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, stretch film

ve desikatör). Kuru zemin ağırlığının %5, %8, 10%'u kadar mPCM zemin ile karıştırılarak, mPCM katkısının kuru zemin içinde homojen olarak dağılımı sağlanmıştır. Her bir katkı oranı için kompaksiyon deneyleri yapılmış, optimum su muhtevası değerleri belirlenmiş ve elde edilen değerler Şekil 1'de ve Şekil 1 içerisindeki tabloda sunulmuştur. Standart kompaksiyon enerjisine göre; %5, %8 ve %10 mPCM katkılı zeminin optimum su muhtevası değerleri sırasıyla %39, %39 ve %40 olarak belirlenmiştir. Tüm katkı oranları için belirlenen optimum su muhtevası değerlerinde, zemin-mPCM 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.

Serbest basınç deneyleri için, standart kompaksiyon enerjisi ile optimum su muhtevasında kompakte edilerek hazırlanan numuneden 37.5mm çap ve 75mm yüksekliğinde silindirik serbest basınç deney numuneleri alınmıştır. Deney numuneleri su muhtevasını kaybetmemesi için stretch filme sarılmış ve ilgili donma çözölmeye çevrimlerine maruz bırakılmak üzere donma çözölmeye kabineye yerleştirilmiştir. Numuneler aynı yöntemle mPCM (%0 PCM) eklenmeden ve (%5, 8, 10 mPCM) eklenerek hazırlanmıştır. Katkısız (%0 mPCM) ve katkılı (%5, %8, %10) deney numunelerinde ilgili donma çözölmeye çevrimleri (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11) uygulanarak ASTM D2166 yönetmeliğine göre serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 1.27 mm/dk sabit kesme hızı uygulanarak numunenin serbest basınç mukavemeti (q_u) belirlenmiştir.

Şekil 1'de verilen kompaksiyon deney verileri dikkate alındığında, mPCM oranının artması zeminin maksimum kuru yoğunluğunu azaltmış, optimum su muhtevasını arttırmıştır. Lecompte vd. (2015), bu durumu, mPCM'in daha düşük özgül ağırlığa ve daha çok su emme kapasitesine sahip olması ile ilişkilendirmiştir. Artan mPCM oranı ile elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim arasındaki ilişki literatür çalışmalarını desteklemektedir (Mahedi vd., 2019).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Açıklanan prosedüre göre hazırlanan katkısız (%0 mPCM) ve katkılı (5, 8 ve %10 mPCM) deney numunelerinde donma-çözölmeye çevrimi uygulanmadan serbest basınç 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.

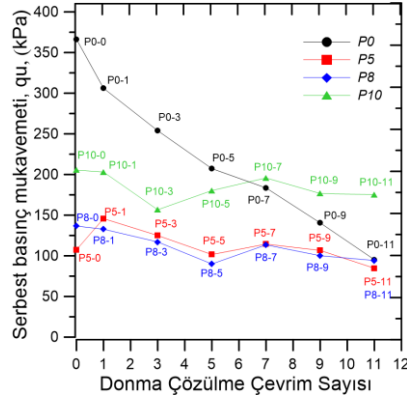
Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda, numuneler -20°C 'de 24 saat ve $+20^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletilerek 1 donma çözölmeye çevrimi tamamlanmıştır (Çiftliklioğlu, 2018; Mahedi vd., 2019). Bu çalışmada da donma ve çözölmeye çevrimleri için -20°C ile $+20^{\circ}\text{C}$ 'de çalışan bir kabin kullanılmıştır. -20°C 'de 24 saat bekletilen numuneler donma sürecini, $+20^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletilen numuneler çözölmeye sürecini tamamlayarak 1 donma-çözölmeye çevrimi tamamlanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri Tablo 2'deki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 2. Serbest basınç deney numunelerinin isimlendirilmesi

mPCM 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 2'de yapılan isimlendirmede, ilk terim zemine katılan mPCM oranını, ikinci terim ise donma çözölmeye çevrim sayısını temsil etmektedir. Buna göre "P8-5", %8 mPCM katkılı deney numunesinin 5 donma-çözölmeye çevrimine maruz kaldığını ifade etmektedir. Deney numuneleri üzerinde ilgili donma çözölmeye çevrimleri tamamlandıktan sonra mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Tablo 2'de isimlendirilmesi verilen deney numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş, deneyler sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_u) ile uygulanan donma çözölmeye çevrim sayısı arasındaki ilişki Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Serbest basınç mukavemeti (qu) – donma çözülme çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 3'te sunulduğu üzere, katkısız zeminde (P0) serbest basınç mukavemeti 366,54 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. Katkısız zemin için en büyük mukavemet kaybı %74 mertebesinde P0-11 isimli numunede olmuştur. P5-0, P8-0, P10-0 numunelerinin serbest basınç mukavemetleri, P0-0 numunesine göre sırasıyla %71, %63 ve %44 azalmıştır. %5 ve %8 mPCM katkılı zeminin (P5 ve P8) 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 mPCM katkılı zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden mukavemet değerinin sabit tutulabildiğini göstermektedir. Ayrıca, mPCM 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.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, soğuk bölgelerde yer alan ve donma çözülme çevrimlerine maruz kalan bir zeminin, değişen sıcaklıklar altındaki davranışında, mPCM'in performansı araştırılmıştır. Bu amaçla, çekirdek malzemesi parafin olan kapsüllenmiş bir mPCM ile donmaya karşı duyarlı yüksek kaolen içeriği olan yüksek plastisiteli killi silt (MH) zemin kullanılmıştır. mPCM'in, 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, mPCM ve zeminin dane boyutlarının birbirine yakın olduğu, bu sayede mPCM ve zeminin homojen olarak karıştığı belirlenmiştir.
- Kompaksiyon deney verilerinden, mPCM ilavesinin zeminin kuru birim hacim ağırlık değerinde azalmaya, optimum su muhtevasında artışa sebep olduğu görülmüştür.
- Yapılan serbest basınç deneyleri ile artan donma-çözülme çevrimlerinin, katkısız zeminin mukavemetini kademeli olarak önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, mPCM katkısının zeminin mekanik davranışını etkilediği, mPCM katkı oranı ile donma çözülme çevrim sayısı arasında önemli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. mPCM'in, katkısız zeminin mukavemetinde azalmaya neden olduğu, ancak artan donma çözülme çevrimlerinde mukavemetin sabit kaldığı görülmüştür. Artan mPCM oranı ile mukavemette artış sağlanmış ve özellikle %10 katkı oranının, donma çözülme çevrimleri boyunca (-20°C ile +20°C), mukavemet davranışı için en uygun oran olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan bu çalışmalar, mPCM katkılı zeminin sıcaklık dalgalanmasından etkilenmeden davranışı sabit tutulabildiğini göstermektedir. Böylece, ısı verme-alma özelliği ile mPCM'in zemin içine katılmasının donma-çözülme çevrimlerinde meydana gelen olumsuz değişimleri etkili bir biçimde azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, mPCM ile yapılacak olan zemin uygulamalarında mutlaka, mPCM'in türü, zeminle uyumluluğu, kimyasal

kararlılığı, termal özellikleri, çevre koruyuculuğı ve bölgesel iklim koşulları ile proje hedef sıcaklığı dikkate alınmalıdır.

TEŐEKKÖR

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 D2166. (2014), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil." ASTM Int., 1–7.
- 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-Çözölme 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., Krafçik, 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.
- Işık, A. (2014), "Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözölme Olayının Deneysel İncelenmesi". İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lecompte, T., Le Bideau, P., Glouannec, P., Nortershauser, D. ve Le Masson, S., (2015), "Mechanical and Thermo-Physical Behaviour of Concretes and Mortars Containing PCM." Energy Build 94:52–60.
- 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.
- 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, İ. (2015), "Effects of Freezing and Thawing on the Consolidation Settlement of Soils". Soil Mechanics and Foundation Engineering. DOI: 10.1007/s11204-015-9336-6.
- 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 Çözülmesine Etkisinin Araştırılması". Academic Platform Journal of Engineering and Science 8-1, 56-61. Doi: 10.21541/apjes.488373.