

SU MUHTEVASININ ZEMİN DONDURMA SÜRECİNDEKİ SICAKLIK DEĞİŞİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WATER CONTENT ON THE CHANGE IN TEMPERATURE DURING THE GROUND FREEZING PROCESS

Berra UZUN¹, Burak EVİRGEN²

ÖZET

Yeraltı su akışının bulunduğu veya su muhtevasının yüksek olduğu kıyı-liman yapıları ile tünel veya derin kazılarda önerilen zemin iyileştirme ve su uzaklaştırma yöntemlerinden birisi de yapay zemin dondurma uygulamasıdır. Dünya genelinde birçok uygulaması olmasına rağmen ülkemizde henüz proje örneğine rastlanmamaktadır. Bu çalışmada, granüler ve kohezyonlu zeminlerdeki değişken su muhtevası değerlerine göre sıcaklık iletimi incelenerek ilgili parametreler elde edilmiştir. Bu amaçla, tasarlanıp üretilen tek doğrultulu ısı iletim deney düzeneği üzerinde eş uzaklıkta konumlandırılan sıcaklık ölçerlerden zamana bağlı sıcaklık değişimleri 18 saat boyunca toplanmıştır. Sonuç olarak CL-ML tipi zeminde sırasıyla %36, %46 ve %56 su muhtevası değerlerinde 12 C°, 16,8 C° ve 19,7 C°'lik sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir. SM zemin tipinde ise %14 su muhtevasında 13,5 C°, %24 su muhtevasında 20,2 C° ve %34 su muhtevasında 8,4 C° sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarında en fazla sıcaklık değişimi SM zemin tipinde 20,2 C° olarak elde edilmiştir. Donma açısından su muhtevasına bağlı optimum süre belirlenerek, yapay zemin dondurmanın projelendirme ve uygulama süreçlerinde aşırı tasarımların önüne geçilmesi suretiyle süre, işçilik ve maliyetten tasarruf sağlanması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, Yapay zemin dondurma, Su muhtevası, Isı iletimi

ABSTRACT

An artificial ground freezing application is one of the proposed methods which is used in ground water flow existence projects or high-water content soils within coastal-port structures as well as in tunnels or deep excavations. Although there are many applications all around the world, there is no applied project in our country, yet. In this study, the related parameters were obtained for temperature conduction according to the variable water con-

¹ İnş. Müh., Eskişehir Teknik Üniversitesi, berrauznn@gmail.com (Sorumlu Yazar)

² Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, burakevirgen@eskisehir.edu.tr



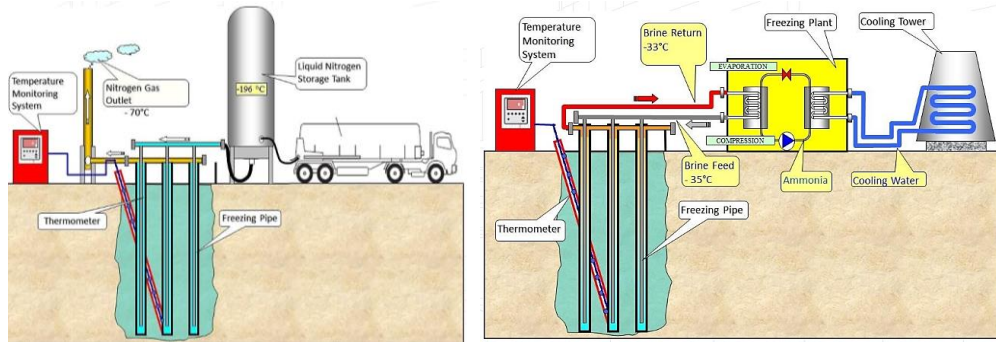
tent values in granular and cohesive soils. For this purpose, time-dependent temperature changes were collected for 18 hours from equidistantly positioned thermo-couples on the designed and produced unidirectional heat conduction experimental setup. As a result, 12 C°, 16.8 C° and 19.7 C° temperature drop occurred in a CL-ML type of soil for 36%, 46% and 56% water content, respectively. In the case of SM soil type, temperature changes of 13.5°C at 14% moisture content, 20.2°C at 24% moisture content, and 8.4°C at 34% moisture content were observed. The maximum temperature change recorded in the experiment was 20.2°C for the SM type of soil. It is expected that an overdesign problem in the project planning and implementation processes of artificial ground freezing, which is leading to saving in time, labor, and cost, will be prevented by determining the optimum duration for freezing with respect to water content.

Keywords: Ground improvement, Artificial ground freezing, Water content, Heat conduction

1. GİRİŞ

Yapay zemin dondurma (YZD), inşaat mühendisliği ve maden mühendisliği alanlarında zemin stabilizasyonu için destek yapıları inşa etmek ve aynı zamanda yeraltı suyu akışını önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Evirgen ve Tuncan, 2019). 1862 yılında Güney Galler'de ilk kez kullanılmaya başlanmasından bu yana, dünya çapında hem geçici hem de kalıcı çözümler sağlayan güvenilir bir teknik olarak kabul görmüştür (Harris, 1995). Geleneksel yöntemlerin aksine, zeminde dondurma teknolojisi, yapay soğutma yoluyla zemini mümkün olduğunca homojen bir şekilde soğutur (Zhou vd., 2022). Boşluk suyu fazını değiştirmek ve dane yüzeyi veya içindeki suyu buza dönüştürmek için etkili bir yöntemdir (Hani ve Evirgen, 2023).

Isı enerjisinin yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa akışına neden olan ve böylece zemini soğutan daha düşük sıcaklıktaki bir ortamın tetiklenmesiyle birlikte, mevcut enerjisi çekildiğinde zemin donar. Yapay zemin dondurmada gerekli ısı enerjisi ve süresi değişmekle beraber, farklı dane boyutu ve özelliklerine sahip tüm zemin koşullarına uygulanabilmektedir. Temel olarak tek gereklilik zeminin yeterli miktarda su muhtevasına sahip olmasıdır (Nicholson, 2014). Metot, su muhtevasının yüksek olduğu zeminlerde, uygun boyut ve aralıkla dondurucu boruların zemine yerleştirilmesi ve bu borulardan dondurucu akışkan geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu sayede donan bölümlerde buzdan duvar elde edilmiş olur (Evirgen vd., 2015). Dondurma için genellikle tuzlu su (-33,4 °C), kuru buz (-78,5 °C) veya sıvı nitrojen (-195,8 °C) kullanılır (Alzoubi vd., 2020). Söz konusu düşük sıcaklıklardan dolayı uygulama alanının güvenliğini sağlamak için donmuş zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimini araştırmak önem arz etmektedir (Ren vd., 2023). Şekil 1a'da verilen açık sistemde hava distilasyonu ile elde edilen sıvı nitrojen, 2-3 barı geçmeyen bir basınçta özel tanklarda muhafaza edilerek şantiyeye taşınıp uygun borulama sistemi içerisinden iletilerek zeminin dondurduktan sonra atmosfer basıncı altında gaz faza dönüşen nitrojen açık havaya bırakılır. Şekil 1b'deki tuzlu su içeren sistemlerde ise özel dondurma üniteleri içinde kalsiyum klorür veya sodyum klorürlü su çözeltileri önceden tanımlanmış bir sıcaklığa soğutulur ve sonrasında kapalı bir devrede dondurma borularına pompalanır (Mira Cattò ve Roberti, 2014).



Şekil 1. Yapay zemin dondurma yöntemleri; a. Sıvı nitrojen kullanımı ve b. Tuzlu su solüsyonu kullanımı (Mira Cattò ve Roberti, 2014)

YZD yönteminin uygulanmasındaki önemli faktörler; boşluk hacmi, su muhtevası, zeminin ısı iletkenlik katsayısı, zeminin başlangıçtaki sıcaklığı, yeraltı suyunun hızı, içeriği gibi zemin özellikleri ve çevresel şartlar ile soğutucu akışkanın sıcaklığı, dondurucu borularının aralığı ve çapı gibi projeye bağlı faktörlerdir (Aras ve Aksoy, 2016). Hızlı yeraltı su akışı, donma kabarması ve çözülme oturması ise YZD yönteminde karşılaşılan olası problemler arasında yer almaktadır (Evirgen ve Tuncan, 2019). Bazı çalışmalarda, yeraltı suyu akışı ile birleştirilmiş YZD yönteminin deneysel yaklaşımına odaklanıldığı görülmektedir. Sres (2009), küçük ölçekli bir kum havuzu boyunca çeşitli yeraltı suyu akış hızlarıyla donan zeminlerdeki hacim artışını incelemiştir. Pimentel vd. (2012) yüksek yeraltı suyu akış hızı içeren YZD için büyük ölçekli fiziksel deney cihazı geliştirmiştir. Sonuçlara göre birden fazla boru ve yüksek debide yeraltı suyu akış hızında yatay ısı iletiminin daha baskın hale gelmesiyle ısı farklılıklarının arttığı görülmüştür. Huang vd. (2013) kontrollü yeraltı suyu akışı ve uygun sınır koşulları altında bir dizi fiziksel deney ve sayısal modelleme gerçekleştirmiştir. Zhou vd. (2022) sıcaklık alanı ve nem değişkenlerine bağlı çevre zemindeki ısı iletimi kriterlerinin belirleyerek, çözülme sürecine dair modelleme yapmışlardır. Donmamış su gözenekli ortamın donma ve çözülme süreçlerinde önemli rol oynar. Zeminde donma sürecinin başlamasıyla birlikte su sıfırın altındaki alanlardan geçer ve bazen şiddetli donma kabarmasına neden olan buz mercekleri oluşturur (Watanabe ve Mizoguchi, 2002).

Bu çalışma kapsamında, tek doğrultulu basit bir dondurma düzeneği ile farklı zemin tiplerinin değişken su içeriklerindeki zamana bağlı ısı parametreleri incelenmiştir. Bu sayede, geçici bir zemin iyileştirme ve güçlendirme metodu olarak kullanılan yapay zemin dondurma yöntemi dahilinde çalışmada kullanılan zemin tipleri için su muhtevasına karşılık elde edilen donma verimliliğine göre en efektif değerler sunulmuştur. Böylece, ön dondurma süresi azaltılarak, maliyet, işçilik ve süre kayıplarının önüne geçilebilecektir.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Zemin Özellikleri

Çalışmada, granüler zemin (SM) ve killi zemin (CL-ML) tipleri kullanılmıştır. Standart proktor deneylerine göre SM ve CL-ML zeminlerin optimum su muhtevası değerleri sırasıyla %14 ve %36 bulunurken, özgül ağırlık ve kıvam limitleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin Özellikleri

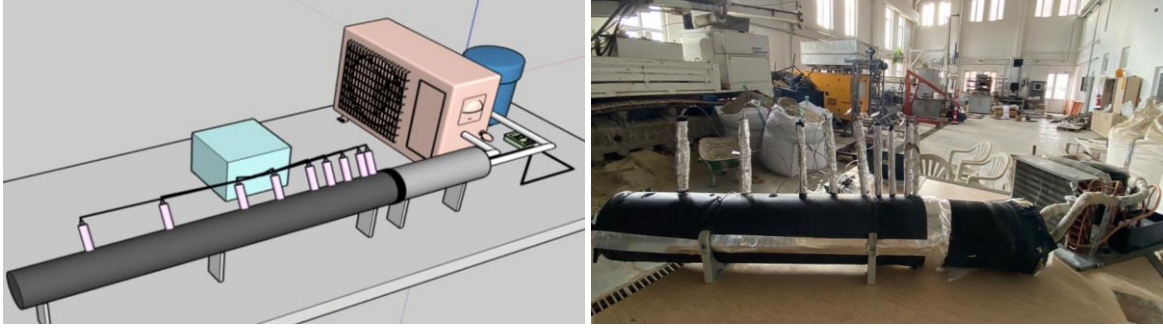
	Özgül Ağırlık (G _s)	Plastik Limit (%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Zemin Sınıfı (USCS)
Granüler Zemin	2,59	43,93	45,40	1,46	SM
Killi Zemin	2,45	42,47	47,37	4,90	CL-ML

2.2. Deney Düzenekinin Tasarımı ve Üretimi

Farklı zemin tiplerinin değişken su içeriklerindeki tek boyutlu sıcaklık iletiminin incelenmesi amacıyla Chen vd. (2014) tarafından kullanılan deney düzenekği baz alınarak benzer bir zemin dondurma sistemi üretilmiştir. Şekil 2a’daki tasarımda gri renkli silindirik deney hücresi 10 cm iç çap ve 15 cm dış çapındaki her biri 1’er m uzunluğa sahip pvc borulardan oluşmaktadır. Borular arasına yalıtım köpüğü sıkılmış ve ayrıca büyük borunun dış yüzeyi kauçuk izolasyon malzemesi ile kaplanarak oda sıcaklığına karşı yalıtım sağlanmıştır. Deney hücresinin bir ucuna bakır borudan teşkil edilen serpantin konumlandırılarak, soğutucu motor vasıtasıyla soğutma sağlanmıştır. Yapay zemin dondurma sürecinde zemin içerisinde meydana sıcaklık değişimleri ölçmek üzere -200 °C’ye kadar ölçüm yapabilen, 1.4301 DIN standardına uygun, paslanmaz koruyucu içeren 5 mm çapında 300 mm boyunda T tipi sıcaklık ölçerler tercih edilmiştir. Cihazın sulu ortamda okuma almasına olanak sağlayacak şekilde sızdırmazlık sağlanmıştır. Tasarlanıp üretimi tamamlanan deney düzenekği Şekil 2b’de verilmiştir. Soğutma kaynağından sırasıyla 2,5-5-10-15-20-30-40-60-80 cm uzaklıklardan zamana bağlı sıcaklık değerlerini elde etmek üzere zemin silindirinin orta noktasına gelecek şekilde sabitlenen sıcaklık ölçerlerden veri toplama cihazı yardımıyla sürekli veri akışı sağlanmıştır.

Serpantin borunun bulunduğu pvc boru deneyler sürecinde sabit kalmaktadır. Isı ölçerlerin bağlı olduğu boruya ise yapay zemin dondurma işlemi uygulanacak zeminler, yalıtımlı silindirik hücrenin içerisine yerleştirilerek farklı su muhtevalarında deneye tabii tutulmuştur.





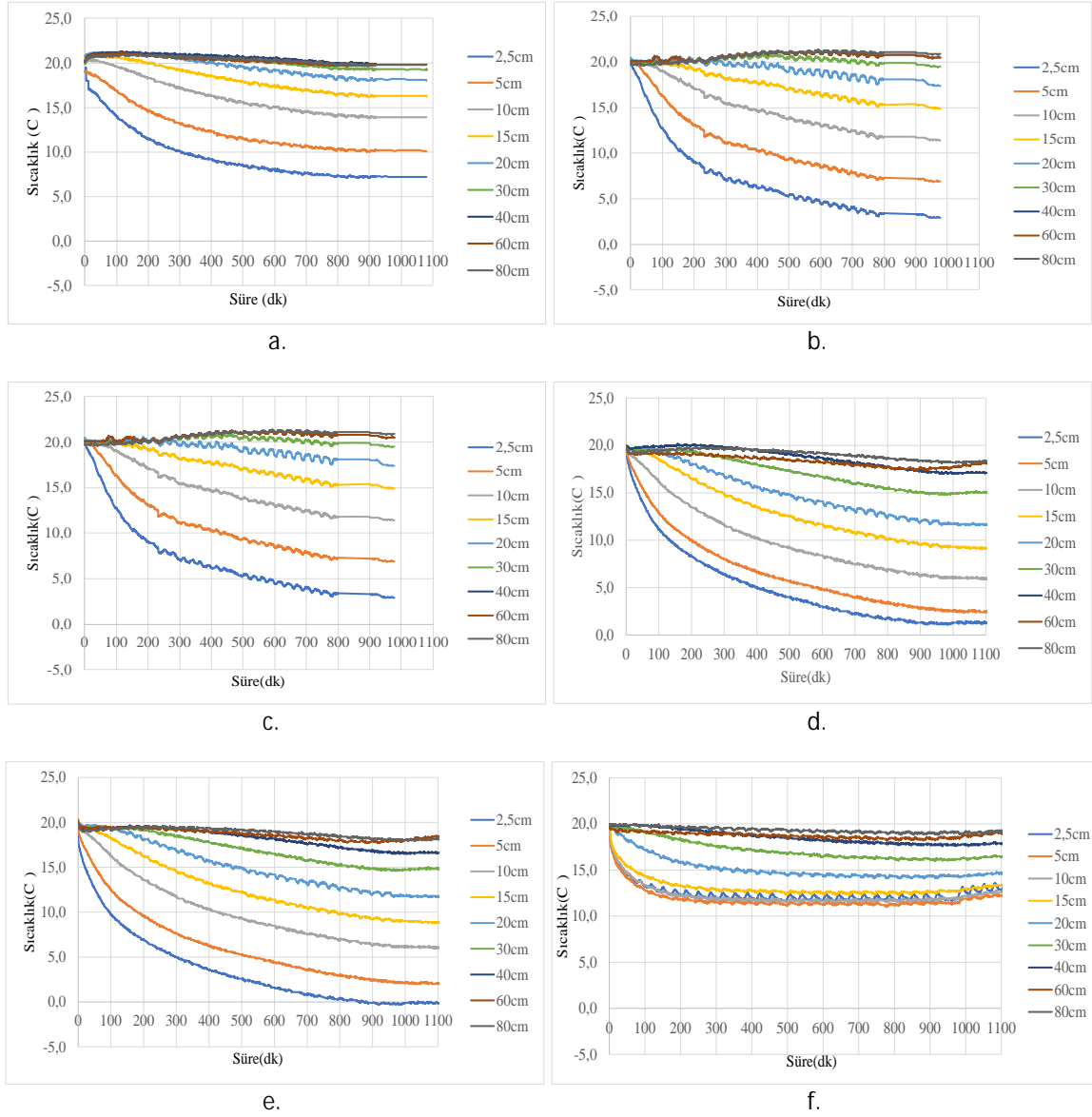
Şekil 2. Tek Eksenli Yapay Zemin Dondurma Düzenegi; a. Tasarım ve b. Sistem

Belirlenen su muhtevalarında hazırlanan numuneler 100 mm çapındaki deney hücresine dik doğrultuda 10 adımda sıkıştırılarak yerleştirilmiş ve içinde bakır boru olan 100 mm çapındaki diğer boru ile birleştirilmiştir. Boruların birleşim noktalarından ısı kaçağı olmaması amacıyla yalıtım bantları yardımıyla kapatılmıştır. Hazırlanan deney düzenegi buzdolabı motoru ile soğumaya bırakılmıştır. Ancak beklenen sıcaklık düşüşü elde edilemeyince, serpantin bulunduğu boruda sızdırmazlık sağlanarak üst kısımdan delik açılmış ve antifiriz eklenmiştir. Antifiriz kullanılmasının amacı; motorun daha etkili çalışmasını sağlamak ve ısı iletiminin verimliliğini arttırmaktır. Yapay zemin dondurma cihazının soğutma mekanizmasında; kondenser, kondenser fanı, alçak basınçlı soğutma kompresörü, dijital termostat, termostatik vana ve kurutucu filtre kullanılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI

Tek eksenli donma sürecinde zemin tipinin farkını gözlemlemek amacıyla kum ağırlıklı SM ve kil ağırlıklı CL-ML tipi zeminlerde, optimum su muhtevası ve optimum değerin %10 ile %20 fazlası olmak üzere 3 farklı su muhtevasında yapay zemin dondurma deneyleri gerçekleştirilmiştir. CL-ML zemin tipi için belirlenen su muhtevaları %36 (optimum), %46 ve %56'dır. SM tipi zemin için belirlenen su muhtevaları ise %14 (optimum), %24 ve %34'tür. CL-ML ve SM tipi zeminler farklı sıcaklık ölçer konumları için zaman bağıli elde edilen sıcaklık değişim eğrileri Şekil 3'te verilmiştir. Sonuçlara göre, yapay zemin dondurma yönteminde optimum su muhtevası artırıldığında sıcaklık değişiminin önce arttığı fakat bir noktadan sonra düşmeye başladığı gözlenmiştir. En efektif dondurma süreci; SM zemin tipinde 24% su muhtevasında 20,2 C° sıcaklık düşüşü ile gözlenirken, CL-ML zemin tipinde 56% su muhtevasında 19,7 C° sıcaklık değişimi meydana gelmiştir (Tablo 15). Optimum su muhtevaları %20 oranında artırıldığında SM zemin tipi, CL-ML zemin tipine göre tüm zemin numunesini etkileyecek bir alanda genel soğutma davranışı sergilemiştir. Bu durumun, kumlu zemin içeriğindeki boşluk miktarlarının killi zemine göre daha büyük olması sebebiyle suyun iletkenliğini ön plana çıkarmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. CL-ML zemin tipinde ise 2,5-5-10-15 cm uzaklıktaki ısı ölçerlerdeki sıcaklık değişim miktarları 20-30-40-60-80 cm uzaklıktaki ısı ölçerlere göre ciddi oranda fazla olduğu için soğutma lokal ve daha efektif olmaktadır.

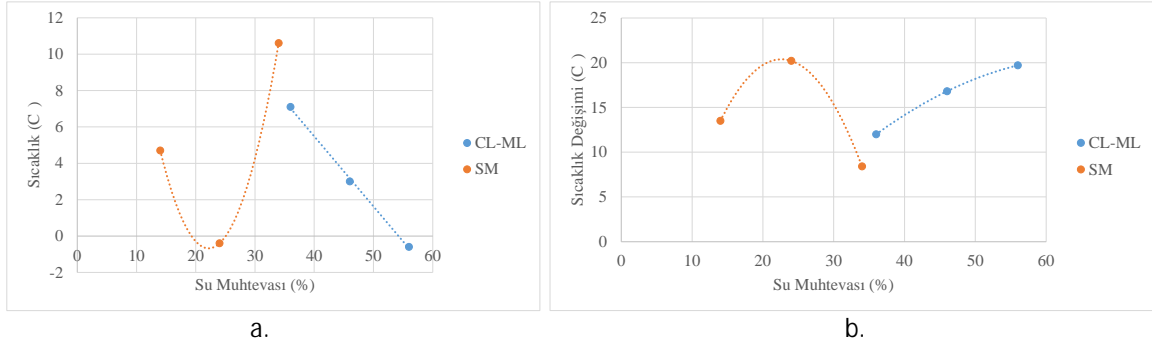




Şekil 2. Zamana bağlı sıcaklık değişimleri; a-c. Sırasıyla, %36, %46, %56 su muhtevası değerleri için CL-ML tipi zemin ve d-f. Sırasıyla, %14, %24, %34 su muhtevası değerleri için SM tipi zemin

Kum ağırlıklı zeminde su muhtevası artışıyla birlikte sıcaklık değerleri önce azalır sonra artan parabolik bir davranış gözlenirken, ince daneli zeminde sürekli azalan bir eğilim meydana gelmektedir (Şekil 3a). Sıcaklık değişimleri dikkate alındığında ise bu eğilimlerin tersi bir dağılım ön plana çıkmaktadır (Şekil 3b).





Şekil 3. Su muhtevasına bağlı; a. Sıcaklık değerleri ve b. Sıcaklık Değişimleri

Eşitlik 1'e göre hesaplanan birim hacimden geçen ısı akış oranları Tablo 2'de verilmiştir.

$$q = k_u i \quad (1)$$

Burada; "q" birim alandan geçen ısı akış oranı (birimi: J/m^2s), k_u donmamış zeminin ısı iletim katsayısı (J/sm), "i" ısı eğim ($^{\circ}C/m$)'dir.

Tablo 2. Isı akış oranları

Mesafe (cm)	SM			CL-ML		
	Su Muhtevası			Su Muhtevası		
	%14	%24	%34	%36	%46	%56
2,5	125,28	25,86	13,44	44,16	63,84	78,01
5,0	62,64	12,93	6,72	22,08	31,92	39,01
10,0	31,32	6,46	3,36	11,04	15,96	19,50
15,0	20,88	4,31	2,24	7,36	10,64	13,00

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek doğrultulu yapay zemin dondurmaya sağlayan bir deney düzeneği tasarlanarak üretimi tamamlanmıştır. İlgili sistemde iki farklı zemin türü için farklı su muhtevalarında deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda; optimum su muhtevasına sahip kil ağırlıklı CL-ML tipi ve SM tipi zeminlerde sıcaklık değişimi sırasıyla $12^{\circ}C$ ve $13,5^{\circ}C$ gözlenmiştir. En fazla sıcaklık düşüşü optimum su muhtevısından %10 daha fazla su içeriğindeki SM zemin tipinde, $20,2^{\circ}C$ hesaplanmıştır. SM zemin tipinde su muhtevası artışıyla birlikte önce azalır sonra artan parabolik bir davranış gözlenirken, CL-ML zemin tipinde sürekli azalan bir eğilim meydana gelmektedir. Isı akış oranları soğutucu kaynağından uzaklaştıkça azalmakta olmakla birlikte SM tipi zeminde su muhtevası artışıyla ters orantılıdır. İnce daneli zeminde ise su muhtevası artışıyla birlikte ısı akış oranı da artmaktadır. Farklı zemin tipleri ve su muhtevaları için olası kirlenmelerle yapılacak deneyler sonucunda, donma açısından su muhtevasına bağlı optimum süre belirlenebilecektir.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma 'Tübitak 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Programı' tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Alzoubi, M.A., Xu, M., Hassani, F.P., Poncet, S. and Sasmito, A.P. (2020), "Artificial Ground Freezing: A Review of Thermal and Hydraulic Aspects", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol104, 103534.
- Aras, O. ve Aksoy C.O. (2016), "Yapay Zemin Dondurma Yöntemi ile Tünel Açma", Seminer, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü.
- Chen, H., Ding, H., Liu, S., Chen, X., Wu, W. and Wang, Q. (2014), "Experimental Study on Heat and Moisture Transfer in Soil During Soil Heat Charging for Solar-Soil Source Heat Pump Compound System", Applied Thermal Engineering, Vol70, 1018-1024.
- Evirgen, B. and Tuncan, M. (2019), "A Physical Soil Freezing Model for Laboratory Applications", Cold Regions Science and Technology, Vol159, 29-39.
- Evirgen, B., Tuncan, M. ve Tuncan, A. (2015), "Yapay Zemin Dondurma Yöntemi ile Örnek Modelleme Çalışması", 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Hani, M. and Evirgen, B. (2023), "A Frozen Soil Sampling Technique for Granular Soils and Thermal Modeling", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol82, 354.
- Harris, J.S. (1995), "Ground Freezing in Practice", Thomas Telford.
- Huang, R.C., Chang, M., Tsai, Y.S., Lu, S.C. and Wu, P. K. (2013), "Influence of Seepage Flow on Temperature Field Around an Artificial Frozen Soil Through Model Testing and Numerical Simulations", 18th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore.
- Mira Cattò F. and Roberti P. (2014), "The Mixed Freezed of Warsaw", Tunnelling Journal.
- Nicholson, P.G. (2014), "Soil Improvement and Ground Modification Methods", Butterworth-Heinemann.
- Pimentel, E., Sres, A. and Anagnostou, G. (2012), "Large-Scale Laboratory Tests on Artificial Ground Freezing under Seepage-Flow Conditions", Geotechnique, Vol62, 227-241.
- Ren, Z., Liu, J., Jiang, H. and Wang, E. (2023), "Experimental Study and Simulation for Unfrozen Water and Compressive Strength of Frozen Soil Based on Artificial Freezing Technology", Cold Regions Science and Technology, Vol205, 103711.
- Sres, A. (2009), "Theoretical and Experimental Investigations on Artificial Ground Freezing in Flowing Groundwater", PhD Thesis, ETH Zurich.
- Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2002), "Amount of Unfrozen Water in Frozen Porous Media Saturated with Solution", Cold Regions Science and Technology, Vol34, 103-110.
- Zhou, X.M., Jiang, G., Li, F., Gao, W., Han, Y., Wu, T. and Ma, W. (2022), "Comprehensive Review of Artificial Ground Freezing Applications to Urban Tunnel and Underground Space Engineering in China in the Last 20 Years", Journal of Cold Regions Engineering, Vol36, 04022002.

