

## ENERJİ KAZIKLARI ÇEVRESİNDE SICAKLIK VE SU MUHTEVASI DEĞİŞİMLERİNE YÖNELİK MODEL ÖLÇEKLI TEST DÜZENEGİ

### A MODEL-SCALE TEST SETUP DEVELOPMENT TO MONITOR TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT VARIATIONS AROUND ENERGY PILES

Mert GÜNER<sup>1</sup>, Semra POLAT<sup>2</sup>, Uğur Can ERGİNAĞ<sup>3</sup>, Melis SUTMAN<sup>4</sup>, Özer ÇİNİCİOĞLU<sup>5</sup>

#### ÖZET

Sığ jeotermal enerji sistemleri arasında yer alan enerji kazıkları, geleneksel temel elemanları olmanın yanı sıra yapı iklimlendirilmesi ve sıcak su ihtiyacını karşılamada kullanılmaktadır ve yapıların karbon ayak izini azaltma yöntemi olarak popülerliği günden güne artmaktadır. Bu sistemlerin tasarımında, zeminin ısı özellikleri, su muhtevası, sıcaklığı ve boşluk oranı gibi faktörlere bağlı olarak, ısı alışverişi performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. İklim değişikliğinin neden olduğu mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları ile ısı alışverişi işlemlerinden kaynaklanan döngüsel sıcaklık değişiklikleri, zeminin su muhtevasını önemli ölçüde değiştirebilir ve bu da zemin ısı özelliklerini etkiler. Bu nedenle, enerji kazıklarının uzun vadeli etkinliğini doğru bir şekilde tahmin etmek için zemin içerisinde su muhtevasındaki değişiklikleri dikkate almak gereklidir. Bu çalışma, enerji kazıklarının çevresindeki sıcaklık ve nem içeriği değişikliklerinin uzun vadeli jeotermal performans üzerindeki etkilerini incelemek için bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için, nem içeriğini ölçmek üzere bir sensör geliştirilmiş ve 5 ile 50°C arasındaki termal döngüler sırasında zemin sıcaklığı ve nem içeriğindeki değişiklikleri izlemek için çeşitli sensörlerle donatılmış bir model ölçekli test kurulumu tasarlanmıştır. Bu çalışmada, model ölçekli testten elde edilen ilk sıcaklık ölçümleri sunulmuştur.

*Anahtar Kelimeler: enerji kazıkları, su muhtevası, model ölçekli test*

#### ABSTRACT

Energy piles, which utilize geothermal energy for efficient heating and cooling of buildings, have become increasingly popular as a strategy for reducing the carbon footprint of structures. The thermal properties of soil are crucial for accurately predicting heat exchange performance, depending on factors such as water content, temperature, and soil

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, mert.guner@bogazici.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Boğaziçi Üniversitesi, semra.polat@std.bogazici.edu.tr

<sup>3</sup> Araştırma Görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, ugurcan.erginag@bogazici.edu.tr

<sup>4</sup> Dr. Öğretim Görevlisi, Edinburgh Üniversitesi, melis.sutman@ed.ac.uk

<sup>5</sup> Profesör, Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioğlu@bogazici.edu.tr

porosity. Seasonal temperature fluctuations driven by climate change, along with cyclic temperature changes from heat exchange operations, can significantly alter soil moisture levels, which in turn affect its thermal properties. Therefore, it's essential to consider variations in soil moisture content to accurately predict the long-term effectiveness of energy piles. This study aimed to develop a model to examine the effects of temperature and moisture content variations around energy piles on their long-term geothermal performance. To achieve this, a sensor was developed to measure moisture content, and a model-scale test setup was created with various sensors to monitor changes in soil temperature and moisture content during thermal cycles ranging from 5 to 50°C. The initial temperature measurements from the model-scale test are presented in this study.

*Keywords: energy piles, water content, model-scale test*

## 1. Giriş

Enerji kazıkları, son zamanlarda binaların çevresel etkilerini azaltmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, derin temeller içine termal boruların entegre edilmesiyle, binaların ısınma ve soğutulması için zemindeki jeotermal enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Brandl, 2006). Enerji kazıkları, yaz aylarında binaların soğutulması için fazla ısıyı zemine transfer ederken, kış aylarında zeminden ısı çekerek binaların ısınmasını sağlar. Bu yöntem, geleneksel ısınma ve soğutma yaklaşımlarına enerji verimliliği yüksek bir alternatif sunmaktadır (Sani vd. 2019, Sutman vd. 2020).

Isıl iletkenlik, ısı transferi analizlerinde jeotermal performansın doğru bir şekilde tahmin edilmesi açısından önemli bir rol oynar. Zemin gibi gözenekli ortamlar içinde, ısı transferi bağlamında, ortamın toplam ısıl iletkenliği zemin daneleri, su ve havanın ayrı katkılarından oluşmaktadır. Zemin danelerinin ısıl iletkenliğinin suyun yaklaşık 10 katı ve havanın 300 katı olduğu düşünüldüğünde, zeminde gerçekleşen iletken ısı transferi büyük ölçüde su muhtevası ve boşluk oranına bağlıdır (Hashemi ve Sutman, 2022). Enerji kazıklarının yaz aylarındaki işletimi sırasında, zemine ısı enjeksiyonu nedeniyle zemin sıcaklığı artar. Sıcaklık artışı, zemin gözeneklerindeki suyun viskozitesinde ve yoğunluğunda azalmaya yol açar, bu da suyun ısı kaynağından uzaklaşmasına ve o bölgede ısıl iletkenlikte bir azalmaya neden olabilir. Kış aylarında ise ters bir davranış beklenir. Ayrıca, suya doygun olmayan zeminlerde ısı enjeksiyonu süreci karmaşıktır ve termal enerjinin hem sıvı hem de buhar halinde su akışına neden olması ile birlikte, faz değişimlerine bağlı olarak gizli ısının transferini de içeren bir etkileşim içerir (Smits vd. 2013, Lu ve Dong, 2015, Moradi vd. 2016, Xu vd. 2019).

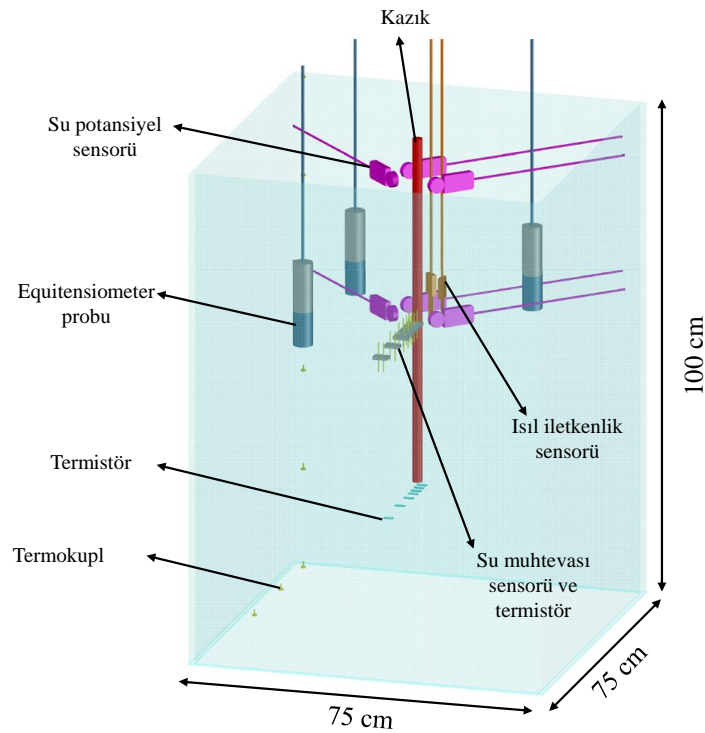
Enerji kazıklarının ömrü boyunca toprak ısıl özelliklerindeki değişimlerin dikkate alınması, jeotermal performanslarının uzun vadeli analizi için büyük önem taşımaktadır. Ancak, çoğu sayısal simülasyonlar, su muhtevası ve zemin sıcaklığındaki değişimlere rağmen, ısıl özelliklerin sabit olduğunu varsayar. Bu nedenle, bu çalışma, enerji kazıklarının çevresindeki sıcaklık ve nem içeriği değişimlerinin uzun vadeli jeotermal performans üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bir model ölçekli test düzenegi geliştirmeyi hedeflemektedir.

## 2. DENEY DÜZENEGİ

Bir enerji kazığı uygulamasında, zemindeki sıcaklık ve su muhtevası değişimine bağlı olarak zeminin ısı iletkenliğinde meydana gelen değişiklikleri gözlemlemek amacıyla model ölçekli bir tank düzeneği planlanmıştır. Model tankın boyutları 75×75×100 cm'dir. Testte kullanılan zemin, %93 silis kumu ve %7 kaolin kili karışımından oluşmaktadır. Karışımın permeabilitesi, sabit seviyeli permeabilite testi ile  $1 \times 10^{-7}$  m/s olarak belirlenmiştir. Karışımın optimum su muhtevası değerini belirlemek için kompaksiyon testleri yapılmış ve test için %8 su muhtevası değeri seçilmiştir.

Model ölçekli testte, çapı 2 cm ve uzunluğu 70 cm olan bir enerji kazığı kullanılmaktadır. Isı transferi, kazığın merkezine yerleştirilen bakır boruların hem ısıtma hem de soğutma işlemleri yapabilen bir termal banyoya bağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık ölçümleri için kazık içerisine, merkezde ve alt ucunda olmak üzere 2 adet termistör yerleştirilmiştir.

Tank içerisine su muhtevası, ısı iletkenlik, sıcaklık ve emme basıncı ölçümleri için çeşitli sensörler stratejik olarak yerleştirilmiştir. Kullanılan sensörler arasında altı adet su potansiyel sensörü, iki adet ısı iletkenlik sensörü, üç adet equitensiyometer probu, sekiz adet termokupl (bunlardan biri çevre sıcaklığını ölçmek için tankın dışında yerleştirilmiştir), yedi adet termistör ve yedi adet su muhtevası ve sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Deney düzeneğinden önce, sensörlerin pozisyonları ve kabloları ölçekli olarak çizilmiş, böylece deney sırasında akışı engellemeyecek şekilde yerleştirilmeleri sağlanmıştır. Bu yerleşim, Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

Tank düzeninde, zemin beş seviyede yerleştirilmiştir ve seviye yükseklikleri sensör pozisyonları dikkate alınarak belirlenmiştir. Her seviyede kompaksiyon uygulanmış ve sensörler uygun derinliklere yerleştirilmiştir. Her seviyede kullanılan malzemenin miktarı ve hacmi ölçülerek tutarlı bir kompaksiyon oranının elde edilmesi amaçlanmıştır. Her seviyedeki kompaksiyon işlemi sonrasında, alınan numunelerle su muhtevası değerlerinin uygunluğu doğrulanmıştır. Kazığın, zeminin ve sensörlerin tanka yerleştirilmesinin ardından, buharlaşmayı önlemek için tankın üst yüzeyi uygun malzemeyle yalıtılmıştır. Daha sonra, tankın tüm yüzeyleri ısı yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır ve bu durum Şekil 2'de gösterilmiştir. Testin başlangıç aşamasında, sabit 50°C sıcaklık uygulanmıştır.



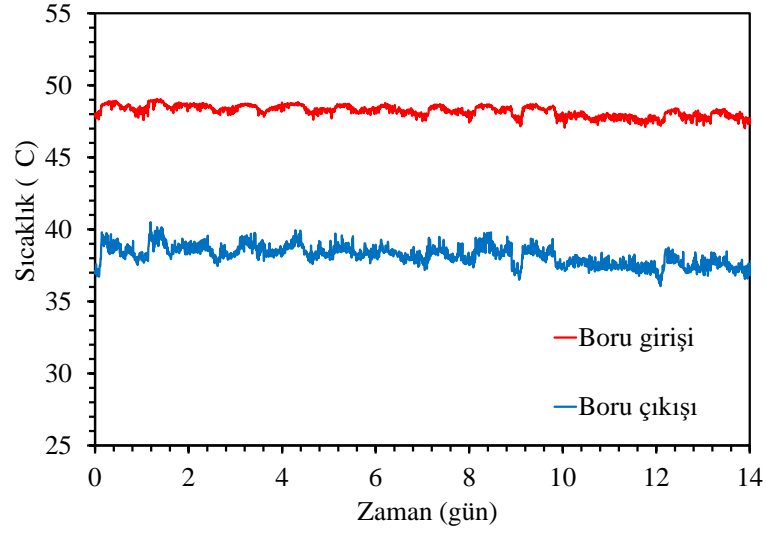
Şekil 2. Termal izolasyon sonrası tank görünümü

### 3. SONUÇLAR

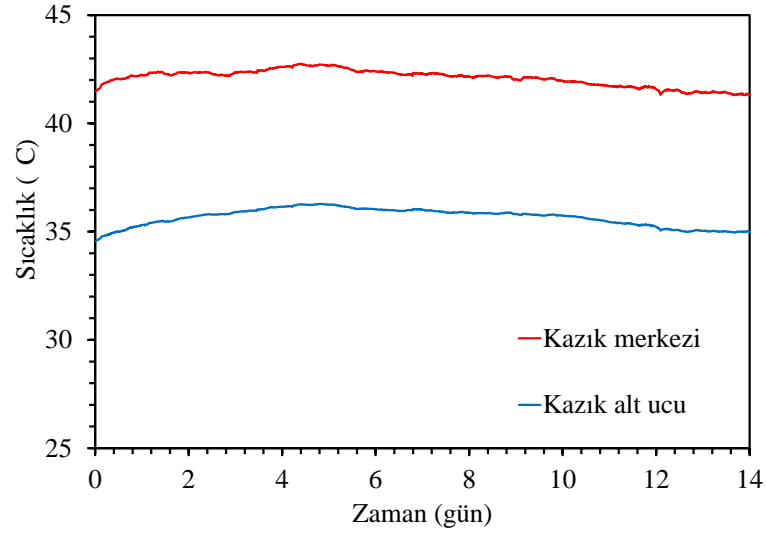
Test boyunca boru giriş ve çıkışında ölçülen sıcaklıklar Şekil 3'te gösterilmiştir. Testte sabit 50°C sıcaklık uygulanmasına rağmen, boru girişinde ölçülen değer ortalama 48°C olarak kaydedilmiştir. Bu sapma, termal banyo ile kazık arasındaki bağlantı borusunun tank yalıtımının dışında bulunması ve ortam sıcaklığından etkilenmesi nedeniyle 2°C'lik bir sıcaklık kaybı yaşanmasına bağlanmaktadır. Boru çıkış sıcaklığı ise ortalama 38°C olarak ölçülmüştür.

Kazık içindeki termistörlerle ölçülen sıcaklıklar Şekil 4'te gösterilmiştir. Kazığın orta seviyesinde sıcaklık değerleri ortalama 42°C, alt seviyede ise ortalama 36°C'ye yükselmiştir.

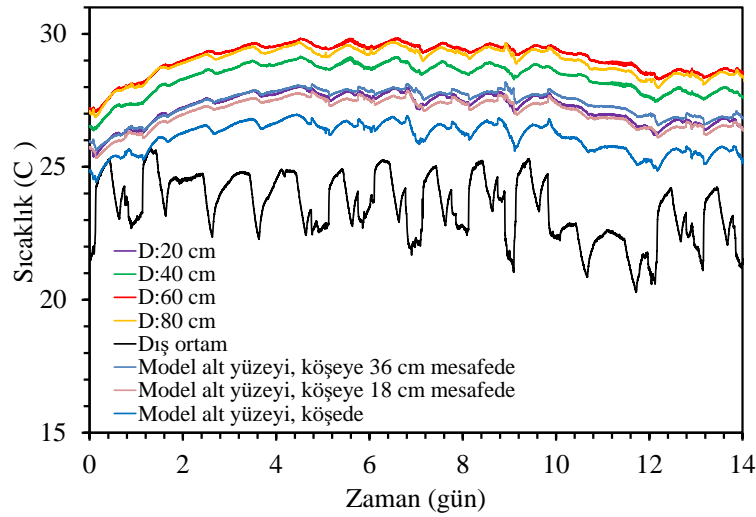
Testte kullanılan sekiz termokupldan yedisi, tankın alt ve yan yüzeylerine yerleştirilmiştir. Kalan termokupl ise yalıtım performansını değerlendirmek amacıyla ortam sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Test sırasında alınan termokupl ölçümleri Şekil 5'te sunulmuştur. Ortam sıcaklıkları gün boyunca 6°C'ye kadar değişebilirken, bu değişim tankın iç yüzeylerinde, sınırına yakın alanlarda yaklaşık 1°C ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 3. Boru giriş-çıkış sıcaklıkları



Şekil 4. Kazık içerisindeki sıcaklık ölçümleri



Şekil 5. Tank yüzeylerindeki sıcaklıklar

#### 4. DEĞERLENDİRME

Enerji kazıklarının uzun vadeli performansı, zeminin ısı özelliklerine bağlıdır ve bu nedenle, zemin sıcaklığı ve hacimsel su muhtevası ile değişen bir özelliktir. Isıtma-soğutma döngüleri meydana geldikçe, zeminin ısı iletkenliği artabilir veya azalabilir. Bu çalışmada, bu olgunun uzun vadeli incelenmesi için kapsamlı bir şekilde enstrümante edilmiş bir model ölçekli test düzeneği geliştirilmiştir.

Test, sürekli ısı uygulayarak tüm sistemin stabilize edilmesiyle başlatılmıştır. Sıcaklık artış miktarının, sensör-kazık görelî pozisyonlarına göre farklılık gösterdiği kaydedilmiştir. Beklendiği üzere, en yüksek sıcaklık artışı boru girişinin yakınında gözlemlenirken, en düşük artış modelin alt sınırlarında elde edilmiştir. Test halen devam etmekte olup, zemindeki sıcaklık, su potansiyeli, ısı iletkenlik ve emme basıncı sürekli olarak kaydedilmektedir; bu parametreler arasındaki karşılıklı bağımlılık ısıtma-soğutma döngüleri ile belirlenecektir.

#### TEŞEKKÜR

*Yazarlar desteklerinden ötürü Cost Action CA21156'ya ve Bilimsel Araştırma Projeleri'ne (BAP) (proje no 19881) teşekkür eder. Bu çalışma ayrıca Royal Society Grant RGS\R2\202298 tarafından da desteklenmiştir.*

#### KAYNAKLAR

- Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, Vol 56(2), 81-122.
- Sani, A., Singh, R., Amis, T., Cavarretta, I. (2019), "A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 106.

- Sutman, M., Speranza, G., Ferrari, A., Larrey-Lassalle, P. and Laloui, L. (2020), "Long-term performance and life cycle assessment of energy piles in three different climatic conditions", *Renewable Energy*, Vol 146, 1177-1191.
- Hashemi, A. ve Sutman, M. (2022), "Thermo-hydro-mechanical behaviour of partially saturated fine-grained soils in the context of energy geostructures", *Soils and Rocks*, Vol 45.
- Smits, K. M., Sakaki T., Howington, S. E., Peters, J. F., and Illangasekare, T. H. (2013), "Temperature dependence of thermal properties of sands over a wide range of temperatures (30–70°C)", *Vadose Zone Journal*, Vol 12 (1).
- Lu, N., Dong, Y. (2015), "Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 141(6).
- Moradi, A., Smits, K. M., Lu, N. and McCartney, J. S. (2016), "Heat transfer in unsaturated soil with application to borehole thermal energy storage", *Vadose Zone Journal*, Vol 15 (10).
- Xu, Y., Sun, D., Zeng, Z., and Lv, H. (2019), "Effect of temperature on thermal conductivity of lateritic clays over a wide temperature range", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 138, 562–570.