Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ENERJİ KAZIKLARIYLA BÜTÜNLEŞİK JEOTERMAL KALDIRIM SİSTEMLERİNİN SAYISAL ANALİZİ

NUMERICAL ANALYSIS OF ENERGY-PILE-INTEGRATED GEOTHERMAL PAVEMENT SYSTEMS

Elvan Keskin[1], Mert Güner[2], Uğur Can Erginağ[3], Özer Çinicioğlu[4]

ÖZET

Küresel enerji talebinin artmasıyla birlikte, çevresel ve ekonomik avantajları nedeniyle jeotermal enerji sistemlerine olan ilgi yoğunlaşmıştır. Geleneksel buz çözme yöntemleri olan tuzlama ve elektrikli ısıtıcıların çevresel zararları ve düşük verimlilikleri, jeotermal kaldırımlar gibi alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çalışma, kış koşullarında yüzeydeki buzlanmayı önlemek amacıyla tasarlanan bir jeotermal kaldırım sisteminin verimliliğini COMSOL Multiphysics yazılımı üzerinden sayısal olarak analiz etmektedir. Araştırma kapsamında, yol kaplamasının altına yerleştirilen yatay borular ile enerji kazıklarına entegre edilmiş ısı transferi boruları bütünleşik biçimde kapalı devre sistem olarak modellenmiştir. Simülasyon sürecinde güneş radyasyonu, rüzgâr ve gizli ısı transferi gibi gerçekçi çevre koşulları modele dahil edilmiştir. Sistemin operasyonel kontrolü, yüzey sıcaklığı 7 °C'nin altına düştüğünde aktifleşecek ve kentsel ısı adası etkisini minimize edecek şekilde kurgulanmıştır. Literatürdeki mevcut modellerden farklı olarak bu çalışma, kaldırım ve enerji kazığı arasındaki ısı transferi etkileşimlerini bütüncül bir yaklaşımla ele alarak ısıl davranışı daha yüksek doğrulukla yansıtmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Jeotermal Kaldırımlar, Enerji Kazıkları, Sayısal Simülasyon*

ABSTRACT

With the continuous increase in global energy demand, interest in geothermal energy systems has grown significantly due to their environmental and economic advantages. The environmental impacts and relatively low efficiency of conventional de-icing methods, such as salting and electric heating, have necessitated the development of innovative alternatives. This study numerically analyzes, using COMSOL Multiphysics software, the thermal performance of a geothermal pavement system designed to prevent surface icing. In the scope of the research, horizontal pipes and heat exchangers integrated into energy piles were modeled as a coupled closed-loop system. During the simulation process, realistic environmental conditions such as solar radiation, wind, and latent heat transfer were incorporated. The operational control of the system was designed to activate when the surface temperature drops below 7 °C and to minimize the urban heat island effect. Unlike existing models in the literature, this study adopts a holistic approach by considering the thermal interaction between the pavement and the energy pile, thereby representing real-world thermal behavior with higher accuracy.

Keywords: *Geothermal Pavements, Energy Piles, Numerical Simulation.*

[1] Doktora Öğrencisi, Boğaziçi Üniversitesi, elvan.keskin@std.bogazici.edu.tr
Araştırma Görevlisi, Doğuş Üniversitesi, ekeskin@dogus.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr., Boğaziçi Üniversitesi, mert.guner@bogazici.edu.tr
[3] Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ugurcan.erginag@bogazici.edu.tr
[4] Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioglu@bogazici.edu.tr

1. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusu, küresel ölçekte enerji talebinin de ivmelenerek artmasına yol açmıştır. Fosil kaynakların sınırlı rezervleri ve çevre üzerinde yarattığı tahribat, bilim insanlarını sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynaklarına ve bu kaynakların entegre edildiği yenilikçi sistemleri geliştirmeye yöneltmiştir. Bu bağlamda jeotermal enerji, yerkabuğunun barındırdığı yüksek ısıl potansiyeli değerlendirmesi bakımından en önemli yenilenebilir kaynaklardan biri olarak kabul edilmektedir. Söz konusu enerjinin kullanıma sunulduğu en gelişmiş mühendislik uygulamalarından birini ise "enerji kazıkları" oluşturmaktadır. Enerji kazıkları, yapıların taşıyıcı temel gereksinimlerini yeterli bir şekilde karşılarken, donatı kafeslerine entegre edilen yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular vasıtasıyla zemin ile üstyapı arasında aktif ısı transferi gerçekleştirebilmektedir. Literatürde enerji kazıklarının statik ve ısıl yükler altındaki termomekanik davranışları, ısıl verimlilikleri ve grup etkileri gerçekleştirilen çeşitli deneysel çalışmalarla geniş ölçüde araştırılmıştır. Ayrıca, boru tipleri, konfigürasyonları ve akışkan karakteristiklerine bağlı olarak sistemlerin ısı değişim kapasiteleri farklı analitik yöntemlerle incelenmiştir. (Akbari Garakani v.d., 2022; Gao v.d., 2008; Gashti v.d., 2014; Mehrizi v.d., 2016; Erginağ v.d. 2025; Güner v.d. 2026)

Enerji kaldırımları, bu teknolojinin ulaştırma altyapılarına uyarlanmasıyla geliştirilmiş inovatif bir konsepttir. Bu sistemlerde, ısı taşıyıcı borular enerji kazıklarına veya sondaj kuyularına entegre edilmektedir. Böylece zemin ile ısı alışverişi yapabilen sistemler kaldırım yüzeyinde ısıl regülasyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Literatürdeki performans analizlerinde kaplama üst yüzeyinden olan gömme derinliğinin ve borular arası aks aralığının sistem verimliliğine etkisi araştırılmış; optimum gömme derinliği 40-60 mm, boru aks aralığı ise 5-40 cm olarak önerilmiştir. Bu sistemlerin zorlu kış şartlarında kar eritme ve buzlanmayı önleme amacıyla otoyol kaplamaları ve karayollarında sürüş güvenliğini artırmadaki etkinliği, sayısal modellemeler (Sonlu Elemanlar Yöntemi- FEM) ve saha deneyleri ile literatürde kanıtlanmıştır. (Ghalandari v.d., 2021; Ghorbani v.d., 2023; Mohammadzadeh v.d., 2024; Pu v.d., 2018)

Bu çalışmada, geleneksel sayısal araştırmalarda sıklıkla rastlanan ve kaldırım ile sondaj kuyusu bileşenlerinin ayrı ayrı modellenmesi nedeniyle aralarındaki ısıl etkileşimin göz ardı edilmesine yol açan yaklaşımlardan farklı olarak, kapalı çevrim bir ısı değiştirici sistem tek bir bütünleşik COMSOL Multiphysics modelinde bir araya getirilmiştir. Çevreye zararlı kimyasal etkileri ve yüksek işletme maliyetleri olan geleneksel tuzlama veya elektrikli rezistans altyapılarına sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir alternatif sunan bu bütünsel simülasyon yaklaşımı, jeotermal kaldırımın ısıl davranışını ve ısı transfer verimliliğini yüksek doğrulukla ortaya koymaktadır.

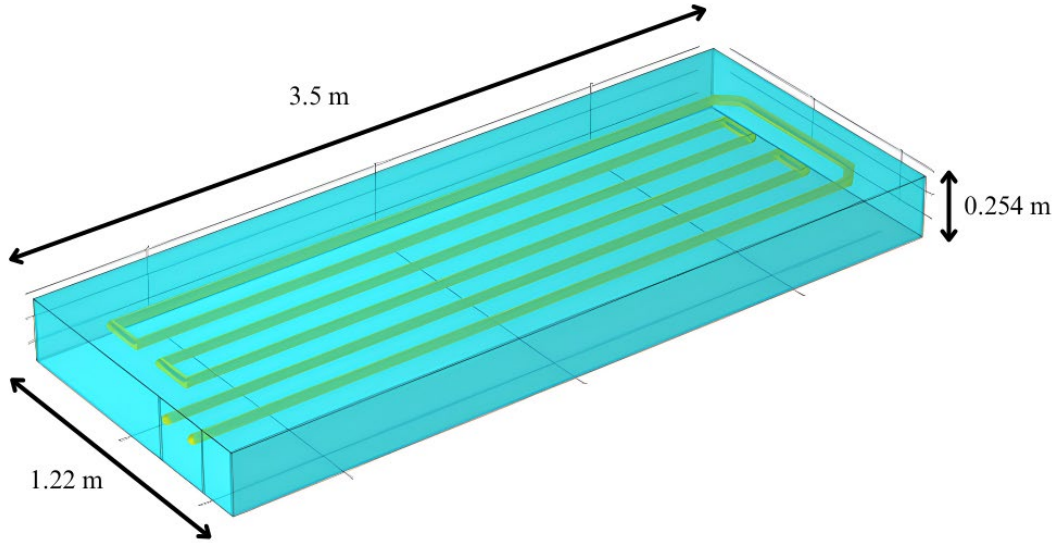
2. SONLU ELEMANLAR SAYISAL MODELİ

Sondaj kuyusu, enerji kaldırımı ve zemin ortamı, COMSOL Multiphysics yazılımının 6.3 versiyonu kullanılarak üç boyutlu (3D) olarak modellenmiş ve sistemin ısıl davranışına yönelik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Model karmaşıklığını optimize etmek amacıyla ısı taşıyıcı borular basitleştirilerek tek boyutlu (1D) elemanlar olarak tanımlanmıştır.

2.1. Model Geometrisi

Çalışma alanını temsil eden zemin geometrisi 84 m derinliğe ve 10 m çapa sahiptir. Modelde yer alan sondaj kuyusu yapısı 15,24 cm çapa ve 60,96 m uzunluğa sahipken, kaldırım

bileşeni 3,05*1,22*0,254 m boyutlarında tanımlanmıştır. Isı taşıyıcı borular kaldırım gövdesinin içerisine tekli U konfigürasyonunda yerleştirilmiştir. Kaldırım içerisindeki boruların iç çapı 1,27 cm, sondaj kuyusu içindeki boruların iç çapı ise 3,81 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Kaldırım Bloğu 3D görüntüsü

2.2. Malzeme Özellikleri

Modelde kullanılan malzeme özellikleri, gerçek saha koşullarını yansıtacak şekilde literatür değerlerine uygun olarak seçilmiştir. Zemin, sondaj kuyusu ve kaldırım katmanları gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Gözenekli ortamlar arasındaki ısı alışverişi aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir.

$$(\rho C_p)_{eff}\frac{\partial T2}{\partial t} + \rho C_{p,flu}.\nabla T2 + \nabla.q = Q + Q_p + Q_{vd} + Q_{geo} \quad (1)$$

Burada, "C_p" özgül ısı kapasitesi (J/kg.K), "T" sıcaklık ($^{\circ}C$), "t" zaman (s), "ρ" akışkan yoğunluğu (kg/m2), "q" iletimsel ısı akısı vektörü (W/m2), "Q" genel hacim ısı kaynağı (W/m²), "Q_p" basınç işinden kaynaklanan ısı transferi (W/m²), "Q_{vd}" viskoz dağılım kaynaklı ısı terimi (W/m²), "Q_{geo}" jeotermal kaynaklı ısı terimidir (W/m²). Boru hatlarında, ısı taşıyıcı akışkan olarak %30 propilen glikol ($C_3H_8O_2$) ve %70 su karışımı dolaştırılmaktadır. Zemin, sondaj kuyularına ve kaldırım malzemelerine ait fiziksel ve ısıl özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin, sondaj kuyusu ve kaldırım malzeme özellikleri

Özellikler	**Zemin**	**Sondaj Kuyusu**	**Kaldırım**
Yoğunluk, ρ (kg/m³)	1800	2400	2400
Young modülü, E (MPa)	25	35000	35000
Poisson oranı, ν	0,3	0,2	0,2
Gözeneklilik, n	0,4	0,1	0,1
Sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, C_p (J/(kg·K))	900	1000	1000

Isıl iletkenlik, K (W/(m·K))	1,8	2	2

2.3. Sınır Koşulları

Zemin modelinin dış çevre ve taban sınırları adyabatik (ısı geçişsiz) olarak kabul edilmiştir. Kaldırım modelinin yan yüzeyleri ise ısıl yalıtımlı olarak modellenmiştir. Zemin ve kaldırım katmanlarının üst serbest yüzeyleri, atmosferik çevre koşullarına duyarlı olacak şekilde tanımlanmıştır. Hava ile yüzeyler arasındaki konvektif ve radyatif ısı geçişlerinin simüle edilebilmesi amacıyla bu dış yüzeylere "enerji dengesi" sınır koşulu uygulanmıştır. Enerji dengesi sınır koşulu; taşınım (konveksiyon), iletim (kondüksiyon), ışınım (radyasyon), güneş ile ısıtma ve yağış yoluyla gerçekleşen ısı transferini içermektedir. Radyasyonun sistemin performansına etkisi birçok çalışma ile incelenmiştir. (Polat vd. 2025) Bu koşul, modele farklı modüller kullanılarak entegre edilmiştir ve formülü aşağıdaki gibidir:

$$q_0 = q_{conv} + q_{rad} + q_{solar} + q_s \quad (2)$$

Burada, "q_0" kaplama yüzeyindeki toplam ısı akısı (W/m²), "q_{conv}" konveksiyon ısı akısı (W/m²), "q_{rad}" radyasyon ısı akısı (W/m²) ve "q_s" kar erimesi için gerekli net ısı akısı (W/m²) anlamına gelmektedir. Sistemde kar erime süreci, kaldırım yüzey sıcaklığı 0°C'yi aştığında aktifleşen bir yüzey ısı yükü olarak tanımlanmıştır. Bu modellemede kar yağış yoğunluğunun yanı sıra karın 0°C'ye ısınması için gereken duyulur ısı ve erimesi için gereken gizli ısı hesaba katılmıştır.

Sayısal modelde Ankara iline ait meteorolojik veriler kullanılmıştır. Zemin başlangıç sıcaklığı 1 metre derinlik için 14 °C, ortalama zemin sıcaklığı ise 15,1 °C olarak sisteme tanımlanmıştır. (Özyurt vd., 2011)

2.4. Olaylar Modülü

Enerji kaldırımı sisteminin dinamik işletim koşulları, COMSOL yazılımı bünyesinde yer alan Olaylar (Events) modülü aracılığıyla kontrol edilmiştir. Bu kapsamda sisteme iki temel çalışma koşulu entegre edilmiştir. Buzlanmayı önleme koşulu, kaldırımın ortalama yüzey sıcaklığının 7 °C'nin altına düşmesi durumunda devridaim pompası otomatik olarak devreye girmekte ve yüzeyin zemin ile ısı alışverişi başlatılmaktadır. Pompanın çalışma prensibi aşağıdaki formül ile kontrol edilmektedir:

$$u_{in} = \frac{\dot{m}\text{pump}}{\rho A} = u_{out} \quad (3)$$

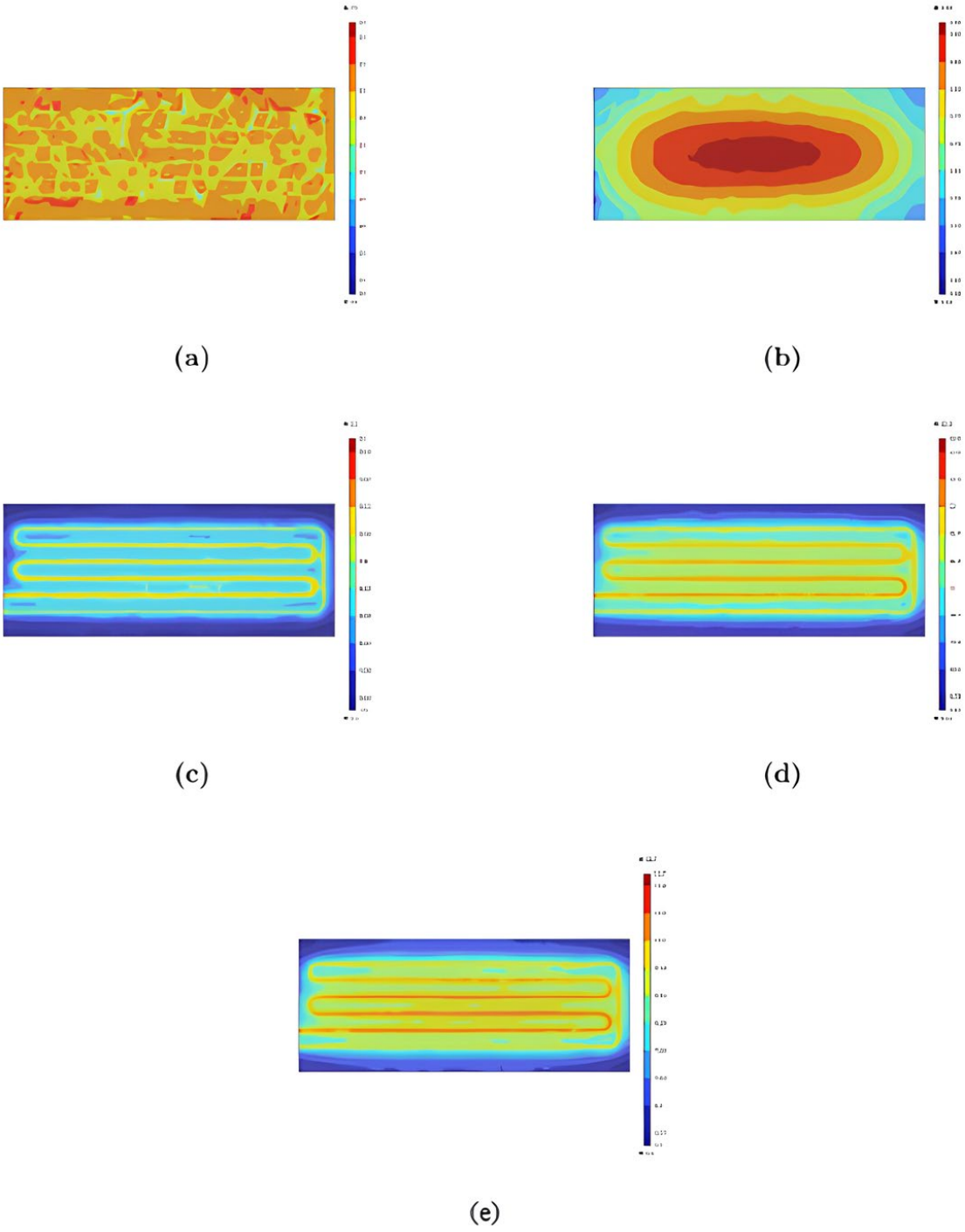
Burada, "u_{in}" girişteki akış hızı (m/s), "$\dot{m}_{pump}$" pompa kütlesel akış hızı (kg/s), "A" boru iç en kesit alanı (m²), "u_{out}" ise çıkıştaki ortalama akış hızını (m/s) temsil etmektedir. Kentsel ısı adası önleme koşulunda ise ortalama kaldırım yüzey sıcaklığının çevre hava sıcaklığını 10 °C aşması durumunda pompa çalıştırılmakta ve yüzeydeki aşırı ısı enerjisinin zemin derinliklerine deşarj edilmesi sağlanmaktadır. Bu özellik sıcak yaz günlerinde yerleşim bölgelerinin ortalama sıcaklığının düzenlenmesine de yardımcı olmaktadır.

3. ANALİZ SONUÇLARI

3.1. Isıl Dengeleme Aşaması (0-90. Günler)

Sistemin performans analizi, zemin ve yapıların ısıl dengesini sağlamak amacıyla 90 günlük bir ön ısıl dengeleme süreciyle başlatılmıştır. Bu süreç zarfında devridaim pompası

çalıştırılmamış ve sistemin kararlı bir başlangıç sıcaklık dağılımına ulaşması hedeflenmiştir. Şekil 2'de, kaldırıma gömülü olan ısı değiştirici boruların 90. günden itibaren aktif hale geldiği net bir şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 2. Farklı zaman aralıklarında ısı iletken borular seviyesinde kaldırım sıcaklık dağılımı: (a) 0. gün, (b) 90. gün, (c) 91. gün, (d) 180. gün ve (e) 457. Gün

3.2. Sistemin Kaldırım Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

Geliştirilen sistemin birincil hedefi, kaldırım yüzey sıcaklığının buzlanma riski barındıran 7 °C eşik değerinin altına düşmesini engellemektir. Sistemin bu performansını nicel olarak

değerlendirmek amacıyla, kaldırım yüzey sıcaklıkları sistemin aktif ve pasif olduğu iki farklı senaryo için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

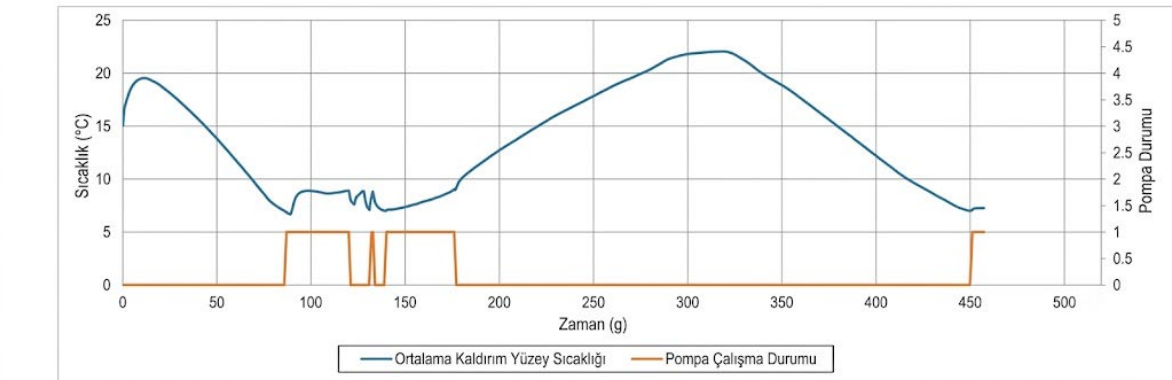
Şekil 3 incelendiğinde; ilk 90 günlük ısıl dengeleme döneminde kaldırım yüzey sıcaklığının tamamen atmosferik hava koşullarına bağlı olarak dalgalandığı, ısı transfer sıvısının döngüsünün başladığı 91. günde ise sistemin devreye girmesiyle birlikte ani bir sıcaklık artışının gerçekleştiği görülmektedir. Sistemin aktif olarak işletildiği senaryoda, kaldırım yüzey sıcaklığının kritik kış dönemleri de dahil olmak üzere hiçbir zaman 7 °C sınırının altına inmediği belirlenmiştir.



Şekil 3. Sistemin aktif ve pasif olduğu senaryolarda kaldırım yüzeyinin 475 günlük sıcaklık profili

3.3. Koşullu Operasyon Altında Performans Değerlendirmesi

Sistemin gereksiz çalışmasını önlemek ve işletme enerji tüketimini optimize etmek amacıyla modelde "Olaylar" modülünden yararlanılmıştır. Ankara ilinin iklimsel verileri doğrultusunda belirlenen 7 °C eşik değeri sınır şart olarak tanımlanmış ve yalnızca kaldırım yüzey sıcaklığı bu değerin altına indiğinde pompanın çalışması koşullandırılmıştır. Bu akıllı kontrol mekanizmasının pompa işletim durumu üzerindeki etkisi Şekil 4'te net bir şekilde takip edilebilmektedir.



Şekil 4. Pompanın ortalama kaldırım yüzeyi sıcaklığına bağlı olarak aktiflik durumu

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, enerji kaldırımı sistemlerinin ısıl performansı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. COMSOL Multiphysics 6.3 yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, kış mevsimi koşulları altında kaldırım yüzeyinde oluşabilecek buzlanma riskinin azaltılması hedeflenmiştir. Enerji kaldırımı ile zemin ortamını bütünleşik bir çevrimde birleştiren pompalı sistem başarıyla modellenmiş ve modele entegre edilen akıllı kontrol koşulları sayesinde sistemin enerji tüketimi optimize edilmiştir.

90 günlük ısıl dengeleme süreci de dahil olmak üzere toplam 457 günlük bir işletim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu uzun süreli simülasyon yaklaşımı, zemin-yapı ısıl etkileşiminin ve sistemin zorlu kış koşullarındaki işletim performansının detaylıca incelenmesine olanak tanımıştır. Zeminden farklı derinliklerde alınan yatay kesit analizleri, sığ derinliklerde iklimsel koşulların zemin sıcaklığı üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşın, 30 m derinlikten itibaren zemin sıcaklığının yıl boyunca sabit kaldığı ve atmosferik dalgalanmalardan etkilenmediği belirlenmiştir. Bu kararlı jeotermal potansiyel, yüzey seviyesindeki buzlanma ve kar birikimine karşı bu enerjinin kullanılmasının uygunluğunu doğrulamaktadır.

Sistemin aktif ve pasif olduğu senaryolar karşılaştırıldığında, aktif zemin ısı transferinin sağlanmadığı kontrol durumunda kaldırım yüzey sıcaklığının 1 °C seviyelerine kadar gerilediği ve donma/buzlanma açısından kritik risk bölgesine girdiği tespit edilmiştir. Aktif jeotermal ısıtmanın uygulandığı senaryoda ise kaldırım yüzey sıcaklığı tüm işletim periyodu boyunca başarıyla 7 °C eşiğinin üzerinde tutulmuştur. "Olaylar" kontrol modülü sayesinde pompanın yalnızca ihtiyaç anında (yüzey sıcaklığı < 7 °C) devreye girmesi sağlanarak gereksiz enerji israfının önüne geçilmiştir.

Elde edilen bulgular, enerji kaldırımı sistemlerinin üstyapı ısıl regülasyonunda son derece etkili ve güvenilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Pompa kontrollü akıllı işletim sayesinde sistemin işletme maliyetleri optimize edilmiş olup, bu teknolojinin otoyol kaplamaları ve kaldırım gibi zemine oturan ulaştırma altyapılarında buzlanmayı önleme amacıyla güvenle uygulanabileceği sayısal olarak değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

Erginağ U.C., Güner M., Polat S., Sutman M., Çinicioğlu Ö. (2025) "Thermally induced tensile hoop stresses in energy piles: Implications for design and operation", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 43.

Garakani, A. A., S. M. Jozani, P. H. Tari and B. Heidari. (2022) "Effects of heat exchange fluid characteristics and pipe configuration on the ultimate bearing capacity of energy piles", Energy, Vol. 248.

Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., & Yang, J. (2008). "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application. Applied Energy", 85(10), 901–910.

Gashti, E. H. N., Uotinen, V. M., & Kujala, K. (2014). "Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study." Energy and Buildings, 69, 165–174.

Ghalandari, T., Hasheminejad, N., Van den bergh, W., & Vuye, C. (2021). "A critical review on large-scale research prototypes and actual projects of hydronic asphalt pavement systems." In Renewable Energy (Vol. 177, pp. 1421–1437). Elsevier Ltd.

Ghorbani, B., Arulrajah, A., Narsilio, G. A., Horpibulsuk S., Buritatum A. (2023) "Geothermal Pavements: Experimental Testing, Prototype Testing, and Numerical Analysis of Recycled Demolition Wastes." Sustainability (Switzerland), 15(3)

Güner, M., Polat S., Erginağ U.C. Sutman M, Çinicioğlu Ö. (2025) "Investigation of thermal stresses in energy walls induced by non-uniform temperature distribution." Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 47.

Mehrizi, A. A., Porkhial, S., Bezyan, B., & Lotfizadeh, H. (2016). "Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger." International Communications in Heat and Mass Transfer, 70, 105–114.

Mohammadzadeh, A., Ghasemi-Fare, O., Sun, Z., & McGinley, M. (2024). "Exploring the Use of Geothermal Piles as an Environmentally Sustainable Method to De-Ice Bridge Decks through Field-Scale Experiment." 751–759.

Ozyurt, O., & Ekinci, D. A. (2011). "Experimental Study Of Vertical Ground-Source Heat Pump Performance Evaluation For Cold Climate In Turkey." Applied Energy, 88(4), 1257–1265.

Polat S., Güner M., Erginağ U.C., Sütman M., Çinicioğlu Ö. (2025) "Analyses of Thermoactive Piles Considering Surface Radiation and Wind Convection Effects" International Journal of Geomechanics. Vol. 25.

Pu, L. Xu, L., Qi, D., Li, Y. (2018). "Structure Optimization for Horizontal Ground Heat Exchanger. Applied Thermal Engineering, 136, 131-140."