

ENERJİ KAZIKLARININ SAYISAL MODELLENMESİNDE YÜZEY RADYASYONU VE RÜZGARIN ETKİSİ

THE INFLUENCE OF SURFACE RADIATION AND WIND ON THE NUMERICAL MODELING OF ENERGY PILES

SEMRA POLAT¹, MERT GÜNER², UĞUR CAN ERGİNAĞ³, MELİS SUTMAN⁴,
ÖZER ÇİNİCİOĞLU⁵

ÖZET

Sürekli artan dünya nüfusunun enerji ihtiyacının karşılanması için sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu noktada Dünya'da güneş enerjisinden sonra en çok bulunan ve kesintisiz bir enerji kaynağı olan jeotermal enerji en iyi alternatiflerden biridir. Bu enerjiyi yapılarda kullanmak için jeotermal enerji yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji kazıkları, sığ jeotermal enerjinin kullanımı için yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır ve son yıllarda önemli bir ilgi görmektedir. Bu ilgi, saha ve model testleri ile sayısal analizlerin artmasına yol açmıştır. Sayısal analizler uyarlanabilir olması nedeniyle değerlidir ancak güvenilirlikleri, saha verilerine karşı sıkı doğrulamaya dayanır. Bu çaba, mekanik, termal ve hidrolojik etkilerin bağlaşıklık etkileşimi nedeniyle zordur. Döngüsel termal yükleme ve mevsimsel sıcaklık değişimleri gibi faktörler, doğrulama sürecini daha da karmaşık hale getirir. Bununla birlikte, çoğu doğrulama çalışması adyabatik termal sınır koşullarını kullanmaktadır ve özellikle yüzeye yakın enerji kazıklarının termal davranışını önemli ölçüde etkileyen atmosferik sıcaklık dalgalanmalarını ve rüzgâr etkilerini göz ardı etmektedir. Bu çalışma, atmosfer ve güneş etkilerini sayısal analize dahil ederek bu boşluğu ele almaktadır. Bu amaçla bu çalışmada, Houston, Texas'ta gerçekleştirilmiş saha ölçekli bir enerji kazığı deneyinin sayısal modeli oluşturulmuştur. Analizde yüzey radyasyonu ve rüzgâr etkisi dikkate alınarak sahadaki zemin ve kazık termal davranışı temsil edilebilmiş ve saha deneyinde elde edilen gerilme ve sıcaklık ölçümleri kullanılarak sayısal model doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: enerji kazığı, saha deneyi, sayısal model, termal davranış

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Boğaziçi Üniversitesi, semra.polat@std.bogazici.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Araştırma Görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, mert.guner@bogazici.edu.tr

³ Araştırma Görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, ugurcan.erginag@bogazici.edu.tr

⁴ Dr. Öğretim Görevlisi, Edinburgh Üniversitesi, melis.sutman@ed.ac.uk

⁵ Profesör, Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioğlu@bogazici.edu.tr

ABSTRACT

Addressing the escalating global energy demand necessitates sustainable energy solutions. Geothermal energy, abundant and continuously available, presents a promising alternative, particularly after solar energy. To utilize this resource effectively in built environments, geothermal energy structures are essential. Energy piles, as an innovative method for exploiting shallow geothermal energy, have garnered significant interest in recent years, prompting increased field experimentation, model testing, and numerical analyses. While numerical analyses offer adaptability, their reliability hinges on rigorous validation against empirical data. This validation process is complex due to the intricate interplay of mechanical, thermal, and hydrological factors, compounded by cyclic thermal loading and seasonal temperature variations. However, existing validation approaches often overlook atmospheric temperature fluctuations and wind effects, which notably influence the thermal behavior of energy piles, especially those near the surface. This study addresses this gap by integrating atmospheric and solar influences into numerical analyses. A numerical model based on a field-scale energy pile experiment conducted in Houston, Texas, has been developed to capture the thermal behavior of soil and pile, accounting for surface radiation and wind effects. Validation of the numerical model against stress and temperature measurements obtained from the field experiment enhances its credibility in simulating real-world conditions.

Keywords: energy pile, field test, numerical modelling, thermal behavior

1. Giriş

Enerji kazıkları, yeryüzünde depolanan sığ jeotermal enerjiyi kullanarak, yapısal destek sağlamanın yanı sıra zemin ile yapı arasında ısı transferine olanak sağlar (Brandl, 2006). Bu kazıklar, tekil ya da grup halinde kullanılarak, binaların iklimlendirme ihtiyaçlarını karşılayarak verimliliği yüksek, düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır.

Son yıllarda, enerji kazıklarının davranışını anlamaya yönelik araştırmalar artış göstermiştir. Tam ölçekli saha testleri, tekil kazıkların performansını ve monotonik ve çevrimsel termal yüklerin aksel ve radyal gerilmeler üzerindeki etkilerini incelemiştir (Sutman vd., 2019, Zhou vd., 2023). Ayrıca, enerji kazıklarının verimliliği ve temel altındaki kazık gruplarının davranışları da araştırılmıştır (Luo vd., 2019, Faizal vd., 2019).

Sonlu farklar, sonlu elemanlar gibi yöntemler kullanılarak yapılan sayısal analizler, enerji kazıklarının davranışını incelemek için birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak uygulanmıştır (Park vd., 2018). Bu analizler, sınır koşullarının istenildiği gibi düzenlenebilmesine ve senaryo simülasyonlarına olanak tanır. Ancak, kullanılan modelleme yaklaşımlarının doğrulukları, saha ya da model ölçekli testler ile doğrulanmalıdır.

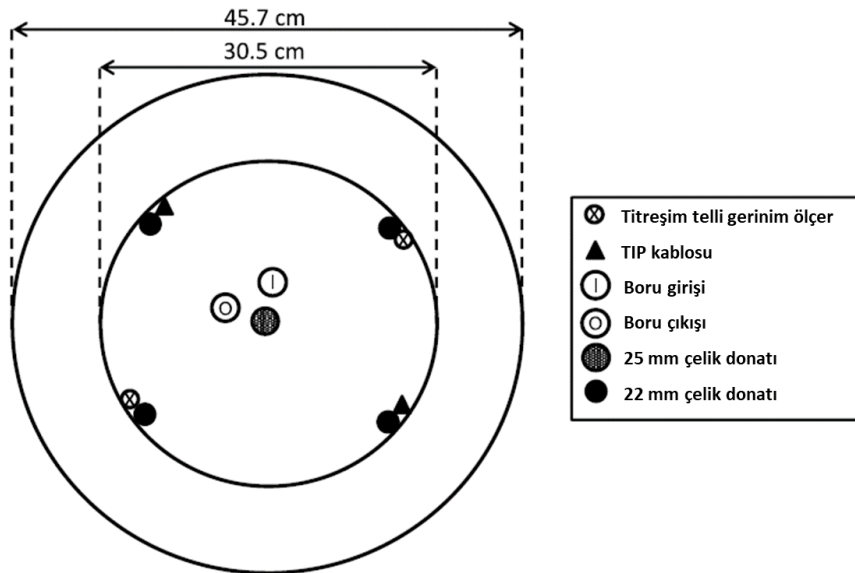
Rüzgar ve solar radyasyonun oluşturduğu atmosferik etkiler, zemin sıcaklığını yüzeyden yaklaşık 10 m'ye kadar etkileyebilmektedir (Kalagirou ve Florides, 2005). Sayısal modelleri doğrulama amaçlı başvuru saha testlerindeki enerji kazıkları da bu gibi çevresel etkilere maruz kalır. Bunun nedeni kazıkların atmosfer ile etkileşimini engelleyen bir üst yapının olmamasıdır. Yüze yakın bölgelerdeki bu sıcaklık değişimi, kazıkların termal davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, mevsimsel sıcaklık dalgalanmaları ve atmosferik

koşulların dikkate alınması, özellikle soğuk iklimlerde enerji kazıklarının verimli bir şekilde tasarlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, doğal atmosferik dalgalanmalar modellenmiştir ve bu sayede enerji kazıklarının termal davranışları daha doğru bir şekilde temsil edilmeye çalışılmıştır. Çalışma, Houston, Teksas'ta gerçekleştirilen bir termal yükleme testine odaklanarak, simülasyon ve saha ölçümleri arasındaki uyumu artırmayı hedeflemektedir.

2. SAHA DENEYİ

Bu çalışmada, Houston, Teksas'ta yerinde dökme yöntemi ile imal edilmiş, çapı 45,7 cm ve uzunluğu 15,24 m olan bir enerji kazığı sayısal olarak modellenmiştir (Sutman, 2016). Kazığın merkezinde, 25,4 mm çapında ve 3,2 mm et kalınlığına sahip tekli U şeklindeki bir HDPE boru yer almaktadır. Bu boru, ısı transferi amacıyla kullanılmakta olup, test boyunca içerisinde %80 su ve %20 antifriz karışımından oluşan bir sıvı, 0,8 m/s sabit hızda dolaştırılmıştır. Borunun termal iletkenlik katsayısı 0,42 W/m/°C olarak belirtilmiştir. Enerji kazığının elastisite modülü 36 GPa, lineer termal genişleme katsayısı ise $1,29 \times 10^{-5} \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 'dir. Kazık içerisinde 5 farklı derinlikte titreşim telli gerinim ölçer bulunmaktadır. Enstrümantasyon derinlikleri ise sırasıyla 2,7 m, 5,7 m, 8,7 m, 11,6 m ve 14,5 m olarak belirlenmiştir. Enerji kazığının enkesitteki konfigürasyonu Şekil 1'de verilmiştir.

Yapılan zemin etütlerine göre, saha zemini ilk 9,8 metrede kil tabakası ile başlayıp, bu derinliğin altında kum tabakası ile devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi, yüzeyden 3,7 metre derinlikte bulunmaktadır. Sayısal analizde kullanılan zemin geoteknik parametreleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.

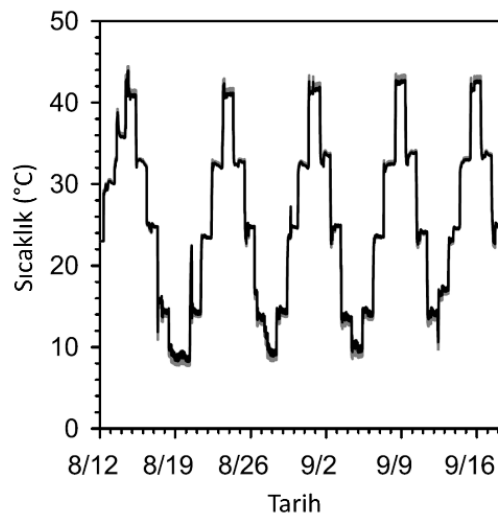


Şekil 1. Enerji kazık enstrümantasyonu

Tablo 1. Zemin geoteknik parametreleri

Zemin katmanı	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson's oranı	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)
Kil	45	0.495	114	0
Kum	75	0.3	5	43

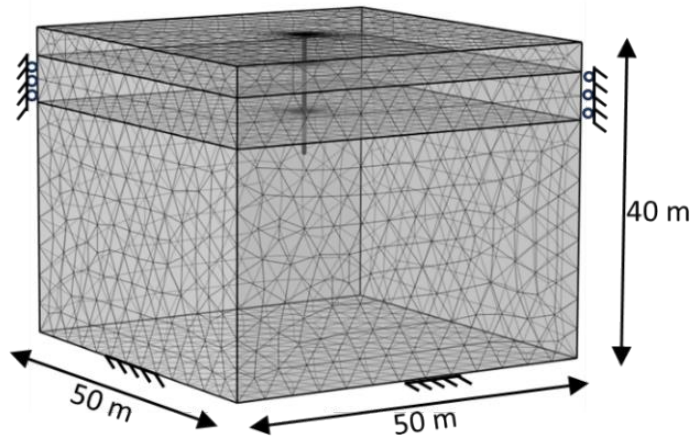
Bu çalışma kapsamında incelenen enerji kazığına, dögüsel termal yüklemeye uygulanmıştır. Bu dögüsel termal yüklemeye, 5 termal dögüden oluşmuş ve toplamda 6 hafta sürmüştür. Kazık içerisindeki borularda dolaştırılan sıvının sıcaklık değışimleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Termal yüklemeye dögüleri

3. SAYISAL MODEL

Enerji kazığının 3 boyutlu sayısal modeli, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Model, 50m x 50m x 40m boyutlarındadır. Sınır koşulları olarak, modelin kenarlarında düşey deplasman serbestliği sağlanırken, taban kısmı ankastre olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 3). Termal sınır koşulları olarak, modelin üst yüzeyi hariç diğer yüzeylerinde termal izolasyon uygulanmıştır. Model üst yüzeyinde ise, solar radyasyon ve rüzgar kaynaklı konveksiyon, bölgedeki hava durumu verileri kullanılarak saha testinden önceki iki aydan itibaren ve test süresince etkilmiştir. Kazık ve zeminlerin başlangıç sıcaklığı, saha ölçümleriyle uyumlu şekilde 21,6°C olarak belirlenmiştir. Bünye modeli olarak zemin için Mohr-Coulomb, kazık için ise doğrusal elastik malzeme modeli uygulanmıştır. Sayısal analizde, Şekil 2'de gösterilen 5 dögüden ilki termal yüklemeye olarak uygulanmış ve başlangıç gerilmeleri geostatik durumu yansıtacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3. Sayısal model ve sınır koşulları

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılan saha deneyinde kazık boyunca termal döngü sırasında oluşan aksel gerilmeler ve sıcaklıklar, sayısal olarak elde edilen değerler ile birlikte Şekil 4'te gösterilmiştir. Sahada, boru ve sensör yerleşimlerinde imalat sürecinden kaynaklanan konumsal farklılıklar bulunmaktadır. Bu sebeple, sensörlerin kazık merkezine olan uzaklıkları 11,7 cm ile 12,9 cm arasında değişiklik göstermektedir. Bu yüzden, sayısal model sonuçları bu aralık göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Şekil 4'te sırasıyla kazık merkezinden kazık çeperine doğru 11,7 cm ve 12,9 cm mesafelerdeki analiz sonuçları "D" ile gösterilmiştir.

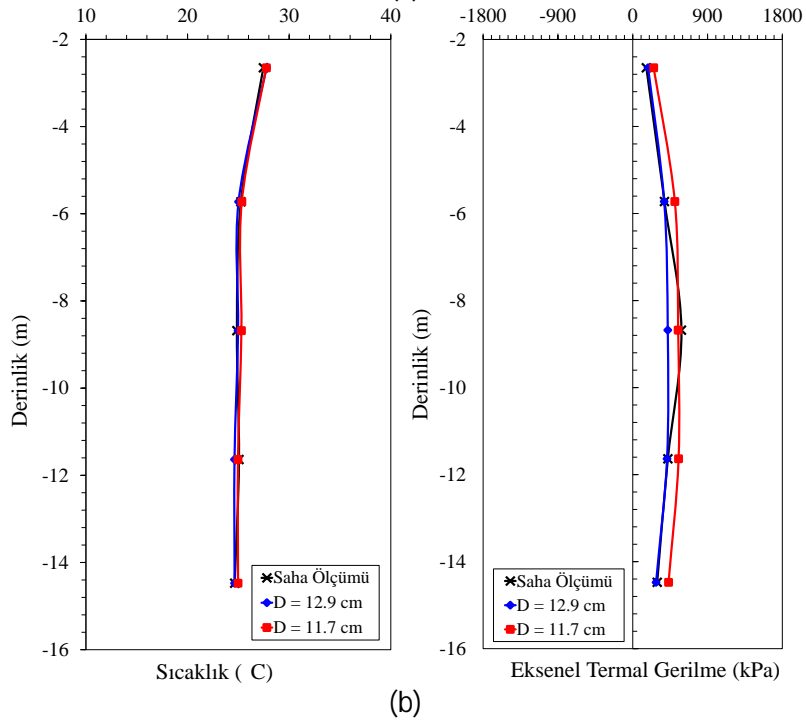
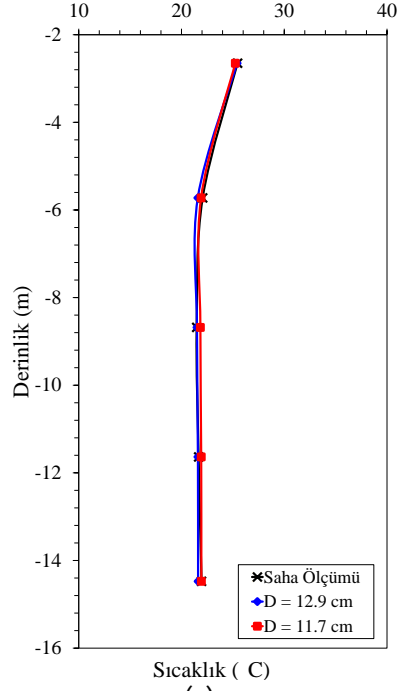
Termal yükleme öncesinde, 2,7 m derinlikte ölçülen kazık sıcaklığı 25,5°C olarak kaydedilmiş, bu sıcaklık 6 m derinliğin ötesinde kademeli olarak 21,5°C'ye düşmüştür. Sıcaklık düşüşü, özellikle solar radyasyon ve rüzgar etkileriyle ilişkili atmosferik koşullardan etkilenmiş olup, sayısal model bu durumu $\pm 0,3^\circ\text{C}$ sapma ile yakından yansıtmıştır. Bu durum, sayısal modelde başlangıç saha koşullarının elde edildiğini göstermektedir.

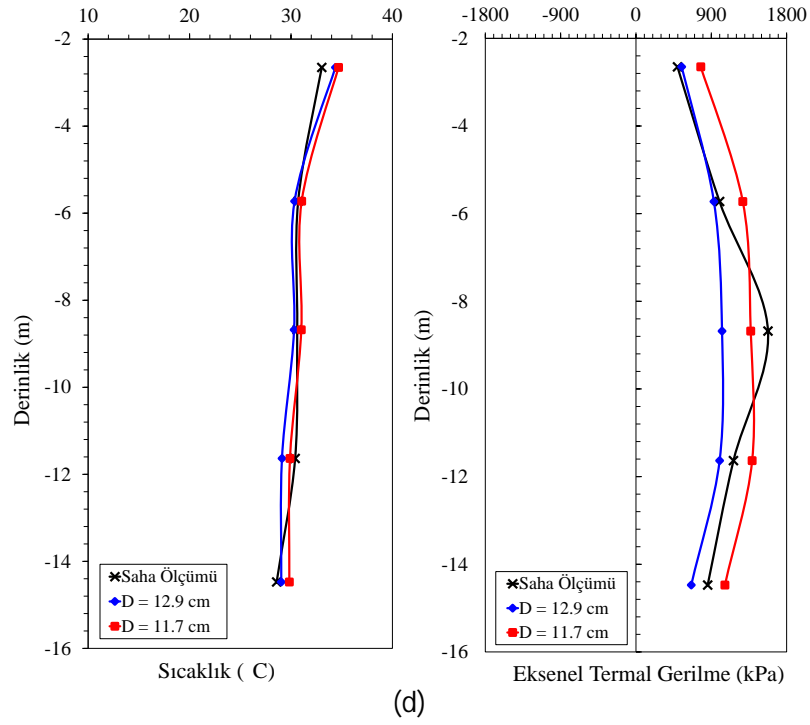
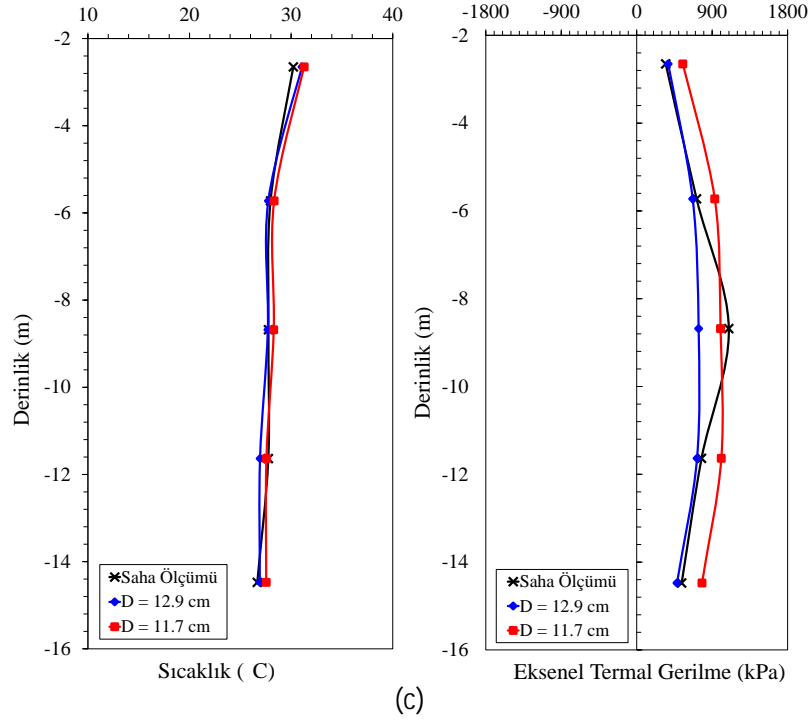
Isıtma periyodunda, boru giriş sıcaklığı üç gün içinde 45°C'ye yükseltilmiş ve 2,7 metre derinlikteki kazık sıcaklığı 31,5°C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık artışı, kazığın orta kesiminde 9,1°C, alt kesiminde ise 6,6°C olarak düzensiz şekilde gerçekleşmiştir. Sayısal analizler benzer sonuçlar vermiş ve sapmalar 1,0°C'nin altında kalmıştır.

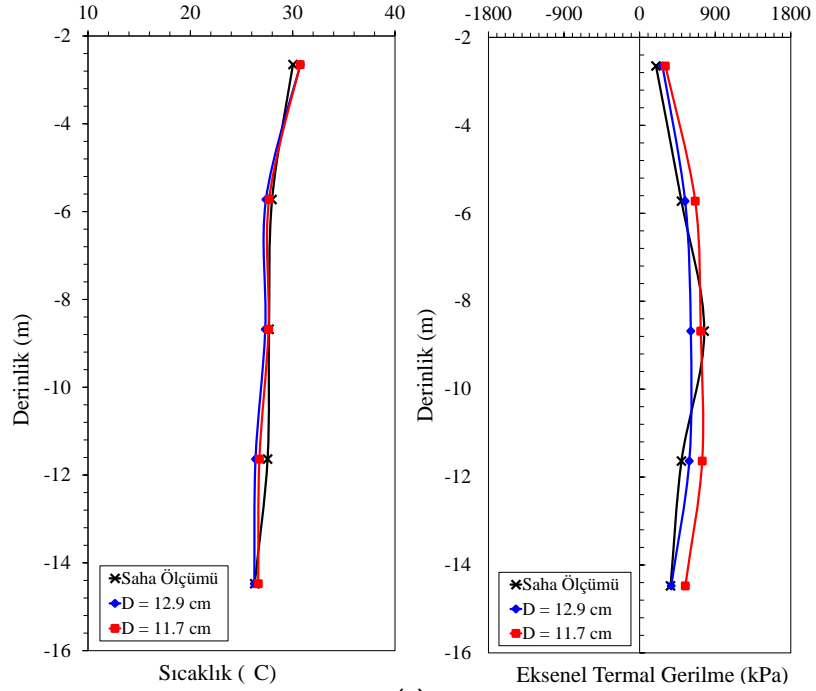
Kazıkta ısınma sırasında sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak aksel gerilmelerde artış gözlemlenmiştir. Grafiklerde basınç gerilmeleri pozitif olarak kabul edilmiştir. En büyük gerilme artışı, kazığın 8,7 metre derinliğinde meydana gelmiştir. Saha ölçümleri, ısıtma periyodunun son gününde kazığın orta kesimindeki aksel gerilmenin yaklaşık 1600 kPa'ya yükseldiğini gösterirken, sayısal analizlerde bu değer yaklaşık 1400 kPa olarak elde edilmiştir. En az artış kazığın üst kısmında gözlemlenmiş olup, 500 kPa olarak ölçülmüş ve sayısal analizlerde 550 kPa ile 750 kPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farklılıklar, sensör pozisyonlarındaki belirsizliklere bağlanmaktadır.

Soğutma periyodu başladığında, kazık boyunca sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. İlk soğutma gününün sonunda (4. gün), beklenildiği gibi kazığın üst kısmında en yüksek sıcaklık düşüşü, yaklaşık 3,0°C olarak kaydedilmiştir. Soğutma periyodunun son gününde, derinlik boyunca

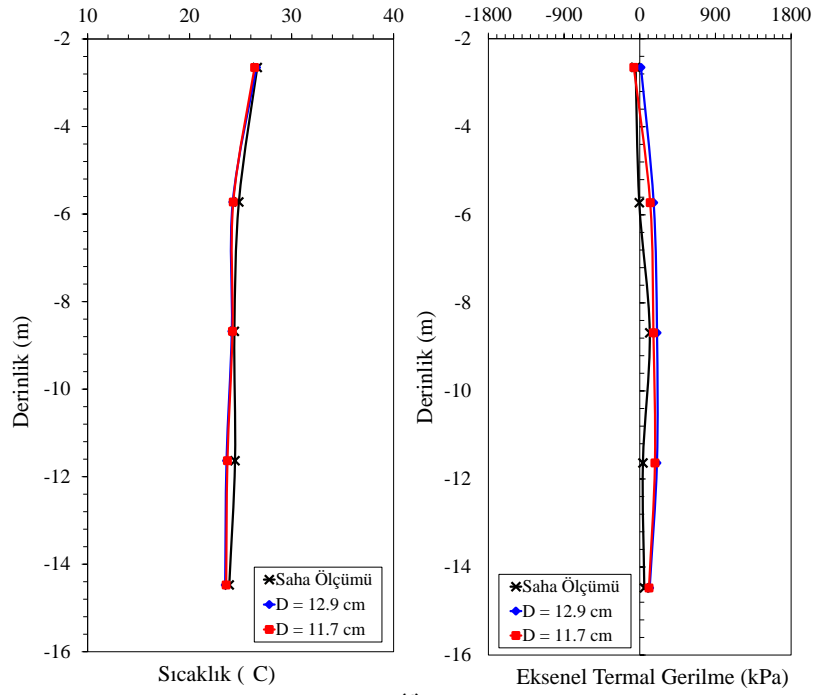
ölçülen ortalama sıcaklık yaklaşık $16,7^{\circ}\text{C}$, hesaplanan sıcaklık ise $16,8^{\circ}\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıklar, test öncesi başlangıç sıcaklıklarının altında olup, soğutma işleminin yüzey güneş radyasyonu ve rüzgar etkilerini bastırdığını göstermektedir. Soğutma periyodu ilerledikçe, aksenal basınç gerilmeleri azalmış ve aksenal çekme gerilmeleri artarak 7. gün sonunda maksimum seviyeye ulaşmıştır. Kazığın orta kesiminde ölçülen en yüksek çekme gerilmesi, 8,7 m derinlikte yaklaşık 1000 kPa olarak kaydedilmiş ve hesaplanan gerilme değerleriyle uyumlu bulunmuştur.



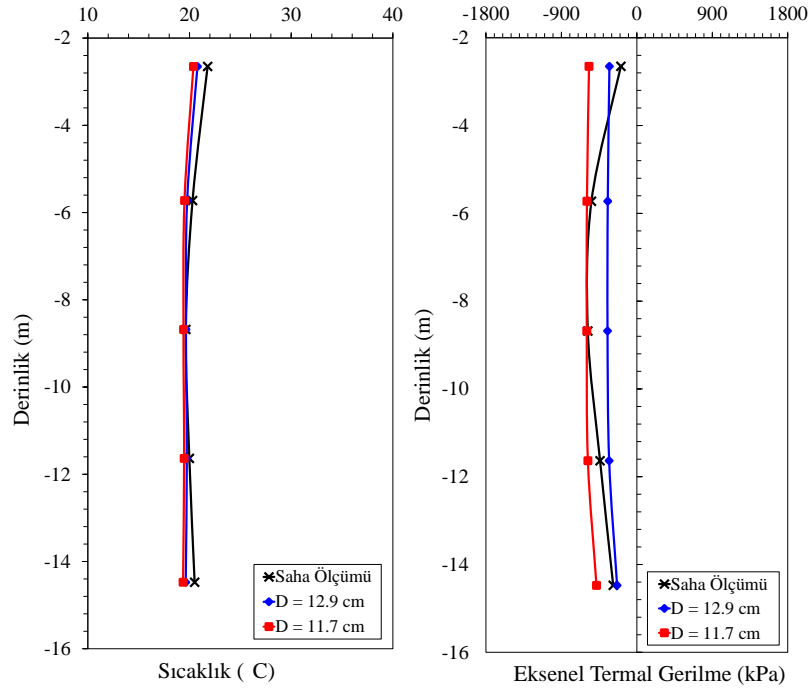




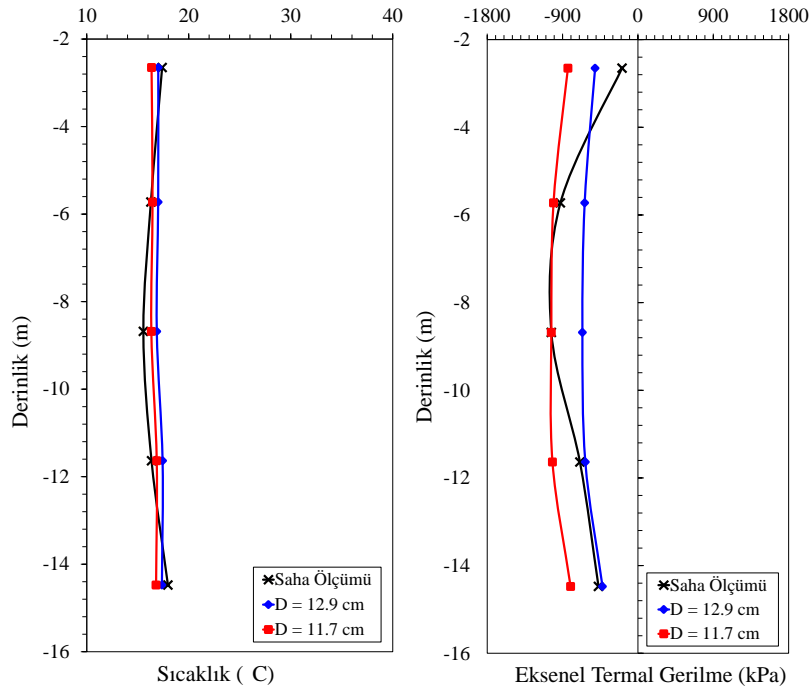
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 4. Saha ölçümünde ve sayısal analizde elde edilen sıcaklık ve gerilmelerin karşılaştırılması: a) Başlangıç, b) 1. gün, c) 2. gün, d) 3. gün, e) 4. gün, f) 5. gün, g) 6. gün, h) 7. gün.

Bu çalışma, saha ölçekli bir enerji kazığının ısıtma ve soğutma döngüleri için termomekanik davranışını sayısal olarak simüle etmeyi amaçlamıştır. Gerçekçi bir termal profilin sayısal modellere dahil edilmesi, enerji kazıklarının daha doğru ve ekonomik tasarımı için gereklidir. Bu nedenle, güneş radyasyonu ve rüzgar etkilerinin hesaba katılması, hem yapısal tasarımı hem de operasyonel verimliliği etkiler. Bu çalışmada, model yan ve alt

yüzeyleri adyabatik olarak modellenmiş olup, üst yüzey ise atmosferik dalgalanmalar, solar radyasyon ve rüzgar etkilerini yansıtacak şekilde modellenmiştir. Termal yükleme, kazık boyunca sıcaklık değişikliklerine ve dolayısıyla eksenel gerilmelere neden olmuştur. Isıtma ve soğutma döngüleri sırasında en büyük değişiklikler kazığın üst ve orta kesimlerinde gözlemlenmiştir. Sahada ölçülen ve sayısal olarak elde edilen gerilme ve sıcaklıkların, sensör yerleşimindeki belirsizliklerden kaynaklanan küçük farklara rağmen, ısıtma ve soğutma döngüleri boyunca birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, sayısal model kazığın termomekanik davranışını etkili bir şekilde yansıtmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı 19881 numaralı proje ile destekleyen Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne (BAP) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, Vol 56(2), 81-122.
- Faizal, M., Bouazza, A., McCartney, J. S., and Haberfield, C. (2019), "Effects of cyclic temperature variations on thermal response of an energy pile under a residential building", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 145(10).
- Kalogirou, S., and Florides, G. (2005), "Measurements of ground temperature at various depths" 8th REHVA World Congress.
- Luo, J., Zhang, Q., Zhao, H., Gui, S., Xiang, W., Rohn, J., and Soga, K. (2019), "Thermal and thermomechanical performance of energy piles with double u-loop and spiral loop heat exchangers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 145(12).
- Park, S., Lee, S., Oh, K., Kim, D., and Choi, H. (2018), "Engineering chart for thermal performance of cast-in-place energy pile considering thermal resistance", *Applied Thermal Engineering*, Vol 130, 899–921.
- Sutman, M. (2016), "Thermo-mechanical behavior of energy piles: full-scale field testing and numerical modeling", Doktora tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Sutman, M., Brettmann, T., and Olgun, C. G. (2019), "Full-scale in-situ tests on energy piles: Head and base-restraining effects on the structural behaviour of three energy piles", *Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol 18, 56–68.
- Zhou, Y., Kong, G., and Li, J. (2023), "Performance of a belled pile influenced by pile head freedom response to a cooling–heating cycle", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 149(2).