

ENERJİ KAZIKLARININ SAYISAL MODELLENMESİNE DAİR VAKA ANALİZİ

CASE STUDY ON THE NUMERICAL MODELLING OF ENERGY PILES

Semra POLAT¹, Mert GÜNER², Uğur Can ERGİNAĞ³, Melis SÜTMAN⁴, Özer ÇİNİCİOĞLU⁵

ÖZET

Sürekli artan dünya nüfusunun enerji ihtiyacının karşılanması için sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu hususta 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. Sığ jeotermal enerjinin kullanılması amacıyla, yatırım ve işletim maliyetleri açısından en ekonomik ve etkin çözüm, termo-aktif kazıklardır. Enerji kazıkları olarak adlandırılan termo-aktif kazıklar konvansiyonel kazıklardan farklı olarak zemin ile kazık arasında ısı transferine olanak vermektedir. Enerji kazıkları ile yapının iklimlendirme ve sıcak su ihtiyacı karşılanabilmektedir. Enerji kazıklarının tasarımı termal-hidro-mekanik etkilerin bağlaşıklık tanımlanmasını ve çözümlenmesini gerektirmektedir. Bu amaçla bu çalışmada, Houston, Texas'ta gerçekleştirilmiş saha ölçekli bir enerji kazığı deneyinin sayısal modeli oluşturulmuş ve deneyde elde edilen gerilme ve sıcaklık ölçümleri kullanılarak sayısal model doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Kazığı, saha deneyi, sayısal model, termal davranış

ABSTRACT

The world's growing population is increasing the demand for energy. Geothermal energy, a plentiful and continuous energy source, is a top alternative after solar energy. Geothermal energy structures, such as energy piles, are widely used to harness this energy for building climate control and hot water needs. The design of energy piles requires the cohesive definition and analysis of thermal, hydraulic, and mechanical effects. For this purpose, in this study, a numerical model of a field-scale energy pile experiment conducted in Houston, Texas was created, and a numerical model was validated using stress and temperature measurements obtained from the experiment.

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

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu her geçen gün hızla artmaktadır. Güncel haliyle yaklaşık 8 milyar olan nüfusun 2050'ye kadar 9,8 milyar olması beklenmektedir (United Nations, 2019). Bu durum dünyanın enerjiye olan ihtiyacını arttırmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının yaklaşık %60'ı fosil yakıtlardan elde edilmektedir (International

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

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

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

⁴ Doktor Öğretim Görevlisi., Heriot-Watt Üniversitesi, M.Sutman@hw.ac.uk

⁵ Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicoglu@boun.edu.tr

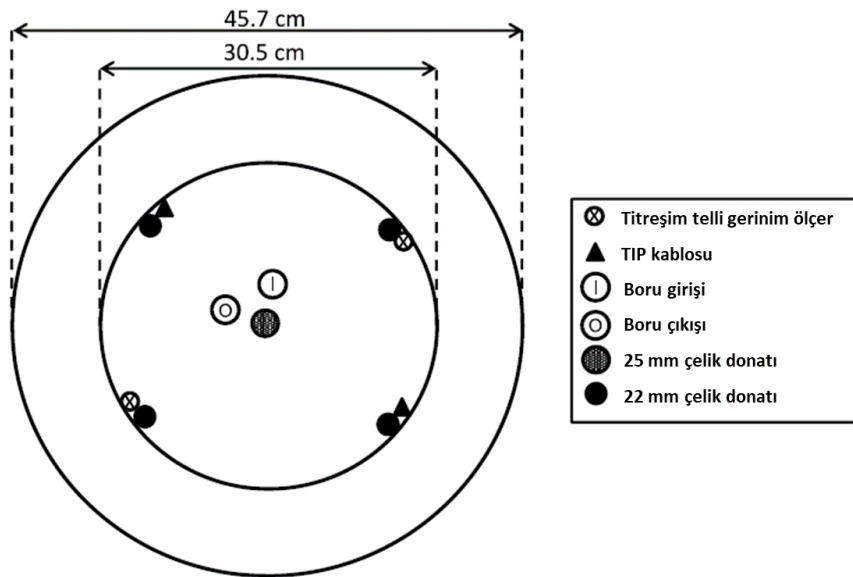
Energy Agency, 2016). Enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımının iki büyük dezavantajı vardır. Bunlardan ilki artan sera gazlarının doğaya verdiği zarar, diğeri ise bu enerji kaynaklarının tükenbilir niteliğidir. Fosil yakıtlara alternatif olarak jeotermal enerji, yer kabuğunda biriken ısı enerjisidir. Dünya’da güneş enerjisinden sonra en çok bulunan yenilenebilir enerji kaynağı jeotermal enerjidir. Jeotermal enerji hava şartlarından bağımsız olarak Dünya’nın her yerinde devamlı bir şekilde ulaşılabilir haldedir (Lee v.d. 2007). Temiz bir enerji kaynağı olan jeotermal enerjinin kullanımı ulaşılabilirlik ve sürdürülebilirlik açısından sağladığı avantajlar nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Jeotermal enerjiden faydalanmak için sığ jeotermal sistemlerden olan ve enerji kazıkları olarak adlandırılan termoaktif kazıklar sıklıkla kullanılmaktadır (Brandl 2006; Hamada v.d. 2007). Enerji kazıkları konvansiyonel kazıklardan farklı olarak zemin ile kazık arasında ısı transferine olanak vermektedir. Enerji kazıklarının içerisinde donatı haricinde borular bulunmaktadır. Boruların içerisinde bulunan sıvının sıcaklığı ısı pompası ile ayarlanabilmekte ve istenilen sıcaklığa erişmiş sıvı yapı boyunca devinim yaparak yapının iklimlendirme ve sıcak su ihtiyacını karşılamaktadır.

Enerji kazıklarının termal yükler altındaki davranışı üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Enerji kazıklarının davranışı termal davranışı saha deneyleri ile tespit edilebilmektedir (Bourne-Webb v.d., 2009, Laloui v.d., 2006, Sutman v.d., 2019, Laloui ve Sutman, 2021) ve sayısal modeller ile de doğrulanmaktadır (Gao v.d. 2008a., Moradshahi v.d., 2021). Bu çalışmada, Houston, Texas’ta gerçekleştirilmiş saha ölçekli bir enerji kazığı deneyinin sayısal modeli oluşturulmuş ve deneyde elde edilen gerilme ve sıcaklık ölçümleri kullanılarak sayısal bir model ile doğrulanmıştır.

2. SAHA DENEYİ

2.1. Enerji kazığının özellikleri

Texas-Houston’da enerji kazığı testi yapılmıştır (Sutman, 2016). Kazık çapı 45,7 cm iken kazık boyu 15,24 m olup “Augered Cast-In Place” (ACIP) tekniğiyle imal edilmiştir. Kazık enstrümantasyonu olarak titreşim telli gerinim ölçerler donatı kafesine kazık boyunca 5 farklı derinlikte yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 1). Kazığın içerisinde yer alan ısı transferine olanak sağlayan borular HDPE olup 25,4 mm çapındadır ve boru et kalınlığı 3,2 mm’dir. Boru şekli kazık merkezinde tekli U borudur. Boru içerisinde kullanılan sıvı %80 oranında su ve %20 oranında antifrizden oluşmaktadır. Boru içerisindeki sıvı akış hızı deney boyunca 0,88 m/s’dir. Borunun termal iletkenlik katsayısı 0,42 W/m/°C’dir. Enerji kazığının elastisite modülü 36 GPa, lineer termal genleşme katsayısı $1,29 \times 10^{-5} \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ’dir. Enstrümantasyon derinlikleri sırasıyla -2,7 m, -5,7 m, -8,7 m, -11,6 m ve -14,5 m’dir.



Şekil 1. Enerji kazık enstrümantasyonu

2.2. Zemin özellikleri

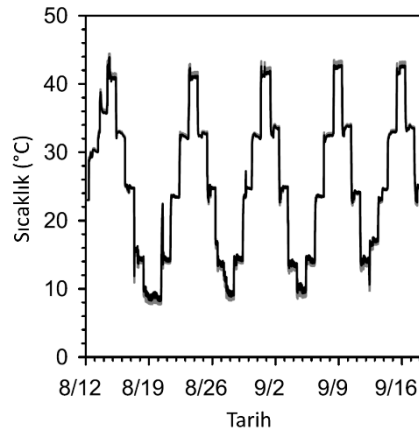
Yapılan zemin araştırmalarına göre saha ilk 9,8m'de kil ve devamında kum zemindir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 3,7m derindedir. Sayısal analizde kullanılan zemin geoteknik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

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

2.3. Deney planı

Bu çalışma kapsamında incelenen enerji kazığı sahada statik olarak yüklenmiştir ve kazığın düşey yük kapasitesi 2558 kN olarak belirlenmiştir. Sonrasında statik yük kaldırılıp döngüsel termal yükleme yapılmıştır. Döngüsel termal yükleme 5 termal döngüden oluşup 6 hafta sürmüştür. Kazık içerisindeki borularda dolaştırılan sıvının sıcaklığı Şekil 2'de verilmiştir.

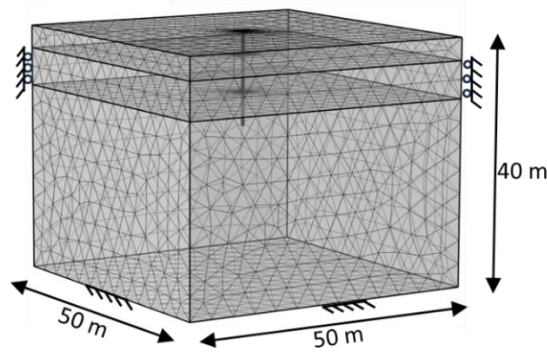


Şekil 2. Termal yükleme döngüleri

3. SAYISAL MODEL

3.1. Sonlu elemanlar sayısal modeli

Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak enerji kazığının 3 boyutlu sayısal modeli oluşturulmuştur (bkz. Şekil 3). Oluşturulan sayısal modelin boyutları 50mx50mx40 m'dir. Model sınır koşulları model kenarlarında düşey doğrultu için kayar mesnetli iken model tabanında ankastredir. Model sınırları üst yüzeyi hariç termal olarak izole edilerek termal sınır koşulları oluşturulmuştur. Kazık ve zeminin başlangıç sıcaklığı saha ölçümleri ile uygun olarak 21,6°C olarak modellenmiştir. Kil ve kum zeminler için Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılırken termal kazık için doğrusal elastik bünye modeli kullanılmıştır. Sayısal modelde termal yükleme için Şekil 2'de gösterilen 5 döngüden birincisi uygulanmıştır. Başlangıç gerilmeleri geostatik durumu temsil etmektedir.

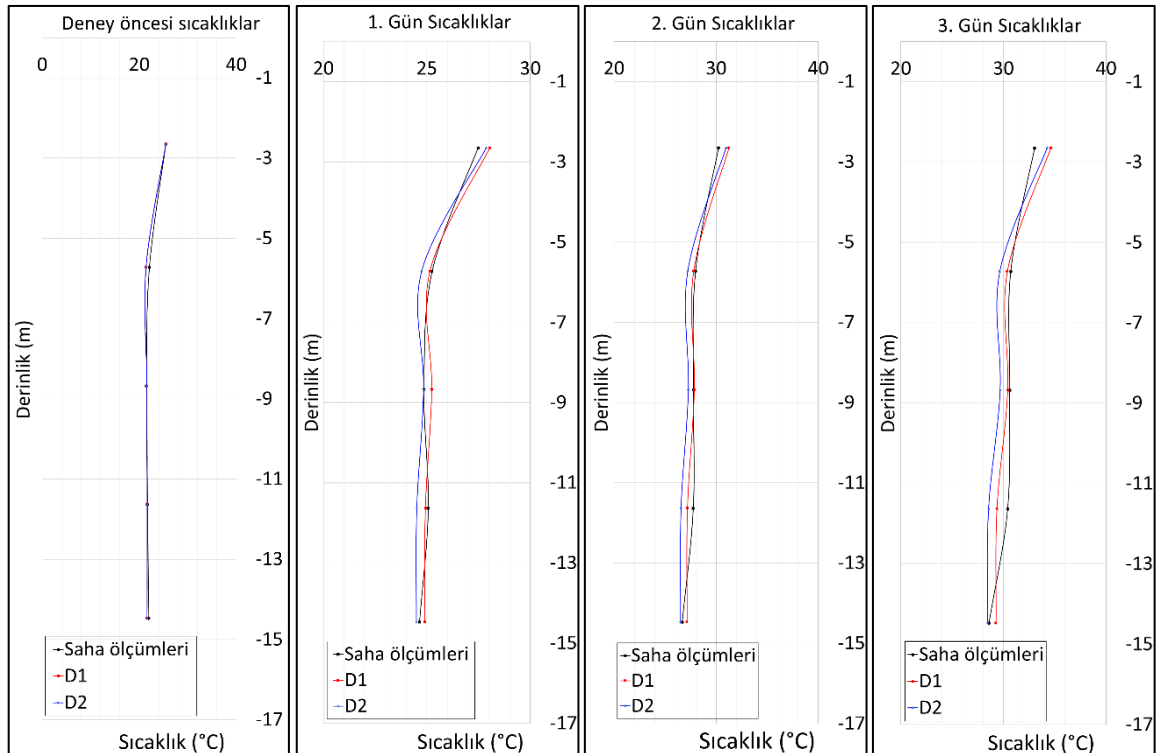


Şekil 3. Sayısal model ve sınır koşulları

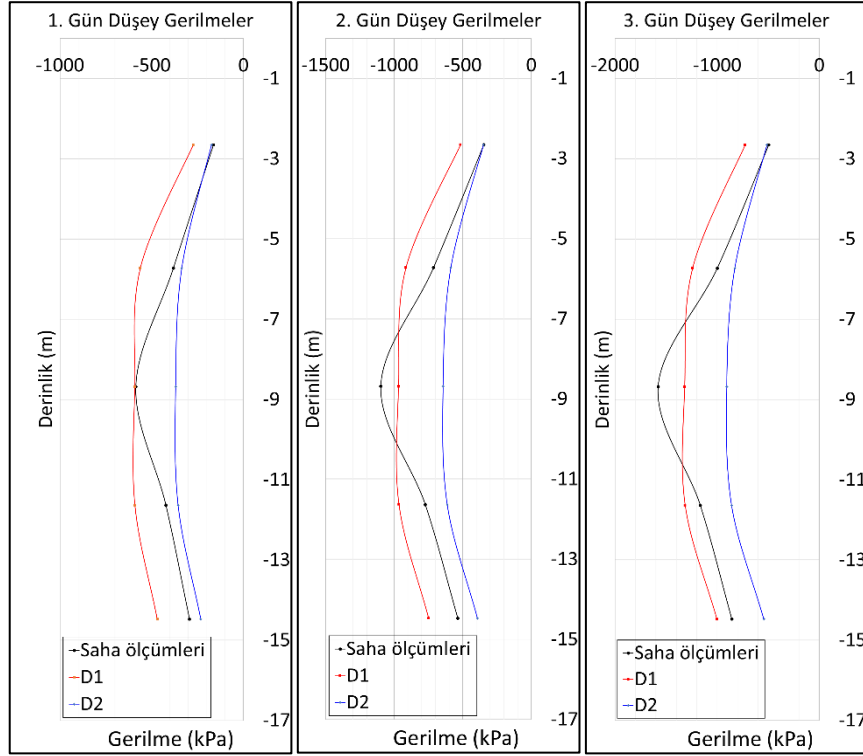
4. SAHA DENEYİNİN VE SAYISAL MODELİN SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Yapılan saha deneyinde kazık boyunca ölçülen sıcaklıklar ve sayısal model ile hesaplanan değerler Şekil 4'te ilk üç gün için takdim edilmiştir. Kazık boyunca sıcaklık ve gerinim ölçümleri Şekil 1'de gösterilen titreşim telli gerinim ölçer sensörleri ile yapılmıştır. Grafiklerde sunulan tüm değerler bu iki sensörden elde edilen değerlerin ortalamasıdır. Sahada boru ve sensör yerleşimlerinde imalattan kaynaklı konumsal farklılıklar vardır. Sensörlerin merkezden uzaklığı 11,7 cm-12,9 cm aralığında değişmektedir. Bu nedenle sayısal model sonuçları bu aralık için verilmiştir. Şekil 4'te yer alan D1 ve D2 değerleri sırası ile kazık merkezinden kazık çeperine doğru 11,7 cm ve 12,9 cm uzaklıktaki analiz sonuçlarını temsil etmektedir. Şekil 4'te görülebileceği gibi saha ölçümleri ile sonuç elemanları sayısal modeli ile hesaplanan sıcaklık değerleri birbirleri ile uyumludur.

Termal yüklemeye kaynaklı oluşan gerilmeler Şekil 5'te sunulmuştur. Yaklaşık 8,7 m derinlikte bulunan sensörden elde edilen gerilim değeri sayısal modelden elde edilen değerden yüksektir. Bahsi geçen durum haricinde sahada ölçülen gerilmeler ile sayısal modelden hesaplanan değerler birbiri ile uyumludur.



Şekil 4. Termal yüklemeye öncesi ve termal yüklemeye boyunca kazık boyunca ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar



Şekil 5. Termal yüklemeye boyunca kazık boyunca ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar

5. SONUÇLAR

Yapılan sayısal analizler neticesinde kazığın termal etkiler altındaki termomekanik davranışı incelenmiştir. Sahada kazık boyunca ölçülen sıcaklıklar ve gerilmeler sayısal model ile karşılaştırılmıştır. Kazığın içerisinde borulardan geçirilen termal sıvı kazıkta sıcaklık artışına sebep olmuştur. Kazıkta sahada ölçülen sıcaklık artış miktarları ile sonlu elemanlar sayısal modeli ile hesaplanan değerler birbirleri ile uyumludur. Kazıktaki sıcaklık artışı kazıkta termal uzamalara neden olmaktadır. Bahsi geçen uzama kazık sınır koşullarına bağlı olarak kazık boyunca ilave eksenel gerilmelere sebep olmaktadır. Termal uzamadan kaynaklı sahada ölçülen ve sayısal modelden elde edilen gerilme artışları 8,7 m derinlikte bulunan sensör haricinde birbirleri ile uyumludur. Bu derinlikte gerilme değerinin sayısal modelden elde edilen değerden farklı olması sahada imalat esansında sensör konumunun değişmesi olarak açıklanabilir.

Enerji kazıklarının sayısal modellenmesinde dikkat edilmesi gereken birtakım hususlar mevcuttur. Bu hususlardan ilki termal sınır koşulları ve buna bağlı olarak kazık ve zemin yüzey sıcaklarının saha deneyinde elde edilen verilerle uyumlu olmasıdır. İkinci bir husus ise saha deneyi yapılan kazıkta sensör yerleşimi ve konumlandırılması önemlidir. Sensörlerin konumu dış etkilerden ve imalat sürecinden etkilenmeyecek şekilde donatıya yerleştirilmelidir. Üçüncü dikkat edilmesi gereken husus ise özellikle suya doymun zeminlerde suyun termal özelliklerinin de göz önüne alınması gerekliliğidir.

KAYNAKLAR

- Bourne-Webb, P.J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., Payne, P. (2009), "Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles", *Géotechnique*, 59(3),237–248.
- Brandl, H. (2006). "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, 56(2),81-122.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., Yang, J. (2008a), "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application", *Appl. Energy*, 85, 901–910.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., Ochifuji, K.(2007), "Field performance of an energy pile system for space heating", *Energy Build.*, 39,517–524.
- International Energy Agency, I. E. A. (2016), "Key World Energy Statistics", International Energy Agency, Paris.
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006), "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 30(8),763–781.
- Lee, S., Speight, J.G., Loyalka, S.K., (2007), "Handbook of Alternative Fuel Technologies", CRC Press.
- Moradshahi, A., Faizal, M., Bouazza, A., McCartney, J.S.(2021), "Cross-sectional thermo-mechanical responses of energy piles", *Computers and Geotechnics*, 138(4),104320.
- Sutman, M. (2016). Thermo-mechanical behavior of energy piles: Full-scale field testing and numerical modeling. Doctoral thesis, Virginia Tech.
- Sutman, M., Brettman, T., 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*, 2352-3808, 56-68.
- Sutman, M., Olgun, C.G., Laloui, L. (2019a), "Cyclic load–transfer approach for the analysis of energy piles", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(1),04018101.
- United Nations, U. N. (2019), "World Population Prospects: The 2019 Revision", Department of Economic and Social Affairs, P. D., United Nations, New York

