

## SABİT BORU/KAZIK ENKESİT ALANI ORANINDA KAZIK ÇAPININ GEOTERMAL ENERJİ KAZIĞI PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

### EFFECT OF PILE DIAMETER ON PERFORMANCE OF GEOTHERMAL ENERGY PILE AT CONSTANT RATIO OF PIPE/PILE CROSS-SECTIONAL AREA

Mürsel ŞERAFEDDİNOĞLU<sup>1</sup>, Ahmet Talha GEZGİN<sup>2</sup>

#### ÖZET

Geotermal enerji kazıkları yapı temeli olarak hizmet veren geleneksel kazıklara, kapalı devre toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin eklenmesi sonucu elde edilen çevre dostu enerji kaynaklarıdır. Bu kazıkların amacı, destekledikleri yapı ile sığ zemin yüzeyi arasında ısı transferi ile yapıya ısıtma/soğutma sağlamaktır. Söz konusu ısı alışverişini sağlarken hem iletebileceği ısı miktarı hem de transfer sırasında kazıklara etkiyecek termal gerilmeler geotermal enerji kazıklarının çalışma verimini tanımlamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında enkesit boru/beton alan oranı sabit olan geotermal enerji kazıklarında boyut değişiminin kazık verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda ilk adım olarak, literatürde yer alan bir saha deneyi Comsol Multiphysics 6.1 yazılımı ile modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak sayısal model doğrulanmıştır. Doğrulama aşamasının devamında, doğrulanmış model referans alınarak sabit enkesit boru/beton alan oranına sahip üç farklı çapta kazık modelleri oluşturulmuştur. Bu kazıklar üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde, enkesit boru/beton alan oranı sabit kazıklarda kazık çapı artışının termal gerilmeleri azalttığı ve ısı iletim oranında artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Isı transferi, geotermal enerji kazıkları, kazık çapı, yenilenebilir enerji*

#### ABSTRACT

Geothermal energy piles are environmentally friendly energy sources generated by the addition of closed-circuit ground source heat pump systems to traditional piles serving as building foundations. These piles provide heating/cooling to the structure by heat transfer between the structure they support and the shallow earth surface. While providing this heat exchange, both the amount of heat that can be transferred and the thermal stresses that will affect the piles during the transfer define the operating efficiency of geothermal energy piles. Therefore, this study investigates the effect of diameter variation on the efficiency of geothermal energy piles with a constant cross-sectional pipe/concrete area

<sup>1</sup> Doktora Öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, [mserafeddinoglu@hotmail.com](mailto:mserafeddinoglu@hotmail.com)

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, [ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr](mailto:ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr) (Sorumlu yazar)

ratio. As a first step, a field experiment in the literature was modeled with Comsol Multiphysics 6.1 software, and the numerical model was validated by comparing the results. After the validation phase, pile models of three different diameters with constant cross-sectional pipe/concrete area ratio were created concerning the validated model. As a result of the analyses performed on these piles, it was observed that increasing the pile diameter decreases the thermal stresses and increases the heat transfer rate for piles with a constant cross-sectional pipe/concrete area ratio.

*Keywords: Heat transfer, geothermal energy piles, pile diameter, renewable energy*

## 1. GİRİŞ

Son yüzyıllarda insan popülasyonunda meydana gelen eksponansiyel artış enerji ihtiyacından kaynaklı fosil yakıt tüketiminde de önemli ölçüde artışa neden olmaktadır. Fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar nedeniyle, temiz enerji kaynakları üzerine yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından geotermal enerji, gezegenimizin büyük bir kısmında kullanılabilen ve uygun değerlendirildiğinde sürekliliği olan bir kaynaktır. Geotermal enerjiden faydalanabilmek için sığ derinliklere inebilmek bile yeterli olabilmektedir. Derinliğe bağlı olarak yerin yaklaşık 10 metre altındaki tabakalarda genellikle zemin sıcaklıkları mevsimsel değişimlerden etkilenmemekte ve 20-22 °C düzeyinde sabit duruma gelmektedir (Erişgen vd., 2022). Söz konusu derinliklere inme yollarından birisi de yapıların derin temellere duyduğu ihtiyaç ile ilişkilidir. Kazıklı temel inşa edilmesi planlanan yapılarda zeminin görece derin katmanlarına ulaşacak bir kazık shaftı açılması sık tercih edilen yöntemlerden birisidir. Geotermal enerji kazıkları, halihazırda açılmış olan kazık shaftı içerisine geleneksel kazık malzemelerine ilave olarak ısı değişimi için döngü sıvısı taşıyacak Yüksek Yoğunluklu Polietilen boruların (HDPE) yerleştirilmesi ve bu boru sisteminin ısı değişimini sağlayacak diğer elemanlar ile birleştirilmesi sonucu oluşturulan yapısal elemanlardır.

Geotermal enerji kazıkları üzerine çalışmalar özellikle son 30 yılda büyük önem kazanmıştır. Kazıkların termal olarak yüklenmesinin etkilerine ilişkin Laloui vd. (1999) çalışmalarında kazıklarda meydana gelecek sıcaklık artışının kazık shaftında mobilizasyona neden olacağını ortaya koymuşlardır. Kazıkların termal olarak aktif zeminlere uygulanmasına ilişkin ise Brandl (2006) taze betonun termal yüklemeye maruz kalması durumunda kalıcı içsel gerilmelerin oluşacağını belirtmektedir. Amatya vd. (2012) çalışmalarında grup kazıkların ısıtma ve soğutma durumlarında mekanik ve termal davranışlarını incelemişlerdir. Wang vd. (2013) ısıtma ve soğutma durumlarında kazık çapındaki değişimleri incelemiş ve geçici mekanik performans değişimlerini ifade etmişlerdir. Bunlara ek olarak araştırmacılar sıklıkla geotermal enerji kazıklarının inşa edilecekleri zemin özelliklerine ilişkin araştırmalar yürütmüşlerdir (Di Donna vd., 2016). Geotermal kazıklarda döngü borusu konfigürasyonu ve boru özellikleri de en fazla araştırılan konulardan bazılarıdır (C. Wang vd., 2017).

Geotermal enerji kazıkları üzerinde saha deneyleri yapmak özellikle maliyet açısından önemli bir dezavantaja sahiptir. Bu nedenle, konu ile alakalı yapılan çalışmaların birçoğu sonlu elemanlar modellerine dayanan parametrik araştırmalar üzerinedir (Rotta Loria vd., 2015; Abdelaziz ve Ozudogru, 2016). Bu çalışma kapsamında da sonlu elemanlar modellemeleri ile parametrik çalışma yapılmıştır. Çalışmada kazık enkesitinde bulunan beton alanı ve döngü borusu net alanı oranını ifade eden boru/beton alan oranının sabit

tutulurak kazık çapının termal ısı oranı ve kazıkta meydana gelen gerilmelerin üzerindeki etkilerinin araştırmak amaçlanmıştır. Bu çalışmada ortaya koyulan “boru/beton alan oranı” ifadesi hem boru konfigürasyonu hem boru çapı hem de kazık çapı parametrelerini aynı anda içermesi açısından önemli ve değerli görülmektedir.

## 2. GEOTERMAL KAZIKLARIN MODELLENMESİ

### 2.1. Doğrulamada Kullanılan Deneyin Özellikleri

Bu çalışmadaki modellerin doğrulanması için Çin'in Nanjing kentinde 13 Ağustos 2019 tarihinde Kong vd. (2023) tarafından başlatılan ve 14 gün boyunca kesintisiz devam ettirilen termal tepki testinden elde edilen verilerden faydalanılmıştır. Deney koşulları malzeme özellikleri ve çevresel faktörler Comsol Multiphysics 6.1 yazılımında modellenmiş ve deney boyunca ölçümlerden elde edilen veriler, sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneyin yapıldığı alandaki zemin katmanlarının 5-8 arasında değişen aşırı konsolidasyon oranlarına sahip 7 farklı kil katmanı olduğu ifade edilmiştir (Kong vd., 2023). Tasarımda kullanılmak üzere derlenmiş olan zemin ve malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Kong vd., 2023).

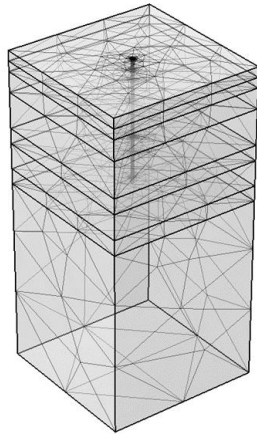
Tablo 1. Malzeme Özellikleri (Kong vd., 2023)

Materyal	Derinlik Katmanı (m) Sıfır yüzey olacak şekilde)	Termal İletkenlik $\lambda$ (W/m <sup>2</sup> /C)	Isı Sığası [J/kg/degC]	Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )	Maksimum Hücumsel Plastik Gerilim	Su Muhtevası (Kg/m <sup>3</sup> )	Porozite	Elastisite Modülü (Mpa)	Poisson Oran	Termal Genleşme Katsayısı ( $\alpha$ (/°C))	Kohezyon (Pa)	İşsel Sürtünme Açısı ( $\Phi$ )
Kil Katmanı 1	0-4	1.66	1494.857	2140.673	0.201	400.288	0.387	220.00	0.30	1000000	52800	19.00
Kil Katmanı 2	4-8	1.57	1570.567	2069.317	0.227	393.757	0.429	200.00	0.30	1000000	37200	20.70
Kil Katmanı 3	8-15	1.53	1549.980	2038.736	0.176	381.227	0.444	220.00	0.30	1000000	36400	21.10
Kil Katmanı 4	15-18	1.61	1510.740	2038.736	0.175	444.728	0.435	180.00	0.32	1000000	25400	22.50
Kil Katmanı 5	18-23	1.56	1606.638	1997.961	0.266	447.953	0.448	230.00	0.30	1000000	17000	20.30
Kil Katmanı 6	23-26	1.48	1481.024	2099.898	0.196	370.163	0.355	230.00	0.30	1000000	60700	17.70
Kil Katmanı 7	26-60	1.72	1541.571	2069.317	0.158	391.039	0.401	280.00	0.25	1000000	42600	20.50
Beton	-	1.74	981.000	2548.420	-	-	-	30900.00	0.20	100000	-	-
Döngü Borusu Materyali	-	0.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

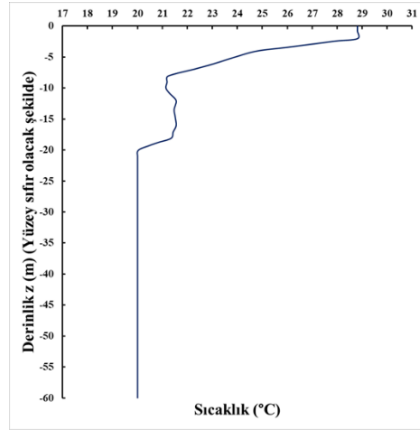
Kong vd. (2023) tarafından paylaşılan verilere göre, saha deneyinde 24 m uzunluğunda ve 0,6 m çapında yerinde dökme betonarme bir kazık imal edilmiştir. Kazık içerisine 0,5 metre çapında donatı kafesi konumlandırılmış ve W konfigürasyonuna sahip döngü borusu bu kafese eklenerek kuyuya indirilmiştir. Kazık tabandaki bir metrelik kısmı hariç 23 m derinlik boyunca döngü borusu konumlandırılmıştır. Deney kapsamında kazığa eklenen döngü borularının iç çapı 23 mm, et kalınlığı ise 2 mm olarak belirtilmiştir. Deney sisteminde kazık içerisinde termal ve fiziksel tepkileri ölçmek amacıyla yüzeyden tabana kadar 2 m aralıklarla sensörler konumlandırılmıştır. Deney kapsamında 14 gün boyunca 2,5 kW sabit enerji veren bir kaynak tarafından ısıtılan su 0,6 m/s hızla döngü borularına gönderilmiştir. Deney boyunca kazığa giren ve kazıktan çıkan suyun sıcaklığı ölçülmüştür (Kong vd., 2023).

### 2.2. Doğrulanmış FEM Modelinin Oluşturulması

Doğrulama amacıyla Comsol Multiphysics 6.1 yazılımında tasarlanan modelde 30 m x 30 m genişliğinde ve 60 m derinliğinde bir alan merkezinde kazık olacak şekilde simüle edilmiştir (Şekil 1a). Saha deneyi sırasında kaydedilen hava durumu verileri Meteorolojik veri dosyasından (ASHRAE 2021) ilgili tarihler ve deneyin gerçekleştiği bölge için seçilmiştir. Model elemanları lineer termo-elastik malzeme olarak tasarlanmıştır. Kazık saha deneyinde de olduğu gibi dışarıdan harici yüke maruz bırakılmamıştır. Zemin birimleri ve kazık poroz malzeme olarak seçilmiştir. Yeraltı su akımları ihmal edilmiştir. Kong vd. (2023) tarafından ölçülen zemin sıcaklıklarının derinliğe bağlı değişimi modele uygulanmıştır (Şekil 1b).



(a)

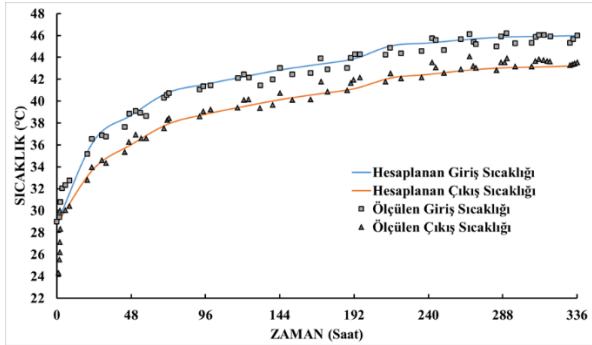


(b)

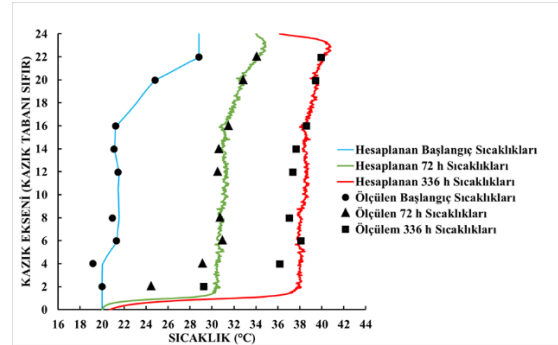
Şekil 1. (a) Doğrulama Modeli (b) Zemindeki Sıcaklıkların Derinlikle Değişimi

Tasarımı yapılan elemanlar arasında meydana gelen ısı transferlerini hesaplamak adına programın Poroz ortamda ısı transferi modülü kullanılmıştır. Döngü borularının ısı transferi ve su sirkülasyonunu simüle etmek adına ise programın "borularda ısı transferi" modülünden faydalanılmıştır. Modelin yan yüzeylerine düşeyde serbest kayar mesnet uygulanmış, model tabanında ise sabit mesnet tanımlanmıştır.

Modelde yapılan analiz neticesinde hesaplanan, kazığa suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları sahada ölçülen veriler ile kıyaslandığında sonuçların oldukça tutarlı olduğu görülmektedir (Şekil 2a). Kazığın yüzeyden tabana kadar derinliğe ve zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi değerlendirildiğinde yine hesaplanan sonuçlar ile saha ölçümlerinin tutarlı olduğu Şekil 2b'de gözlemlenmiştir.



(a)

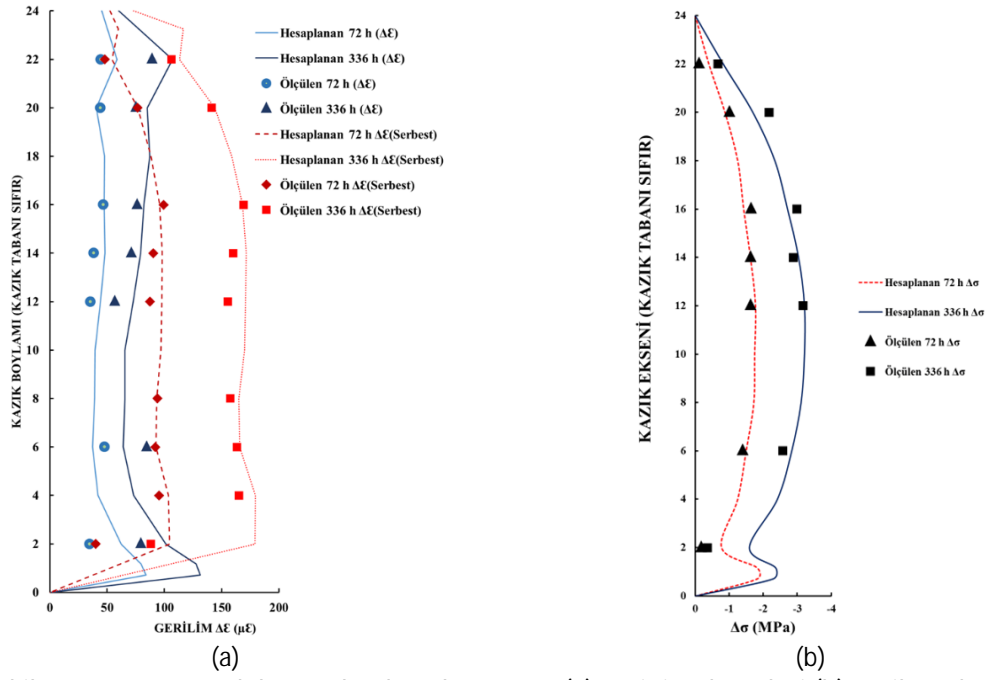


(b)

Şekil 2. (a) Giriş çıkış su sıcaklıkları (b) Kazık aksı boyunca sıcaklık değişimi

Sensörlerin konumlandırıldığı kazık aksı boyunca ölçülen veriler ve simülasyon sonuçlarının gerinim ve gerilme açısından karşılaştırmaları Şekil 3'te gösterilmektedir. Buna göre, hem gerinim hem de gerilme değerleri için yapılan karşılaştırmalar neticesinde büyük bir uyum olduğu görülmektedir.

Analiz sonuçları ile saha ölçümleri arasında birçok parametre için yapılan karşılaştırmalarda görülen uyum, doğrulanmış modelin gerçekçi hesap sonuçları vereceği kanaatini oluşturmaktadır.



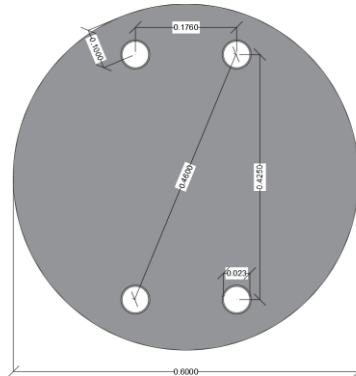
Şekil 3. Deney ve model sonuçları karşılaştırması (a) gerilim değerleri (b) gerilme değerleri

### 2.3. Sabit Enkesit Boru/Beton Alanı Oranında Farklı Çaplara Sahip Kazık Modellerinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında enkesit boru/beton alanı oranı sabit olacak şekilde farklı çaplardaki kazıkların termo-mekanik davranışını incelemek amacıyla doğrulama modeli referans alınarak 0,6 m, 0,8 m ve 1,0 m çaplara sahip üç farklı geotermal enerji kazığı tasarlanmıştır. Kazıkların tamamı doğrulama yapılan zemin koşullarında ve 24 m uzunluğunda olacak şekilde tasarlanmıştır. Kazılarda 10 cm paspayı olacak şekilde W konfigürasyonunda boru yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Her üç kazığın da enkesit boru/beton alanı oranı değerleri 0,0059 olacak şekilde boru çapları kararlaştırılmıştır. Kazıklara ilişkin tasarım özellikleri Tablo 2’de, 1 numaralı kazığın enkesit yerleşimi ise Şekil 4’te gösterilmiştir.

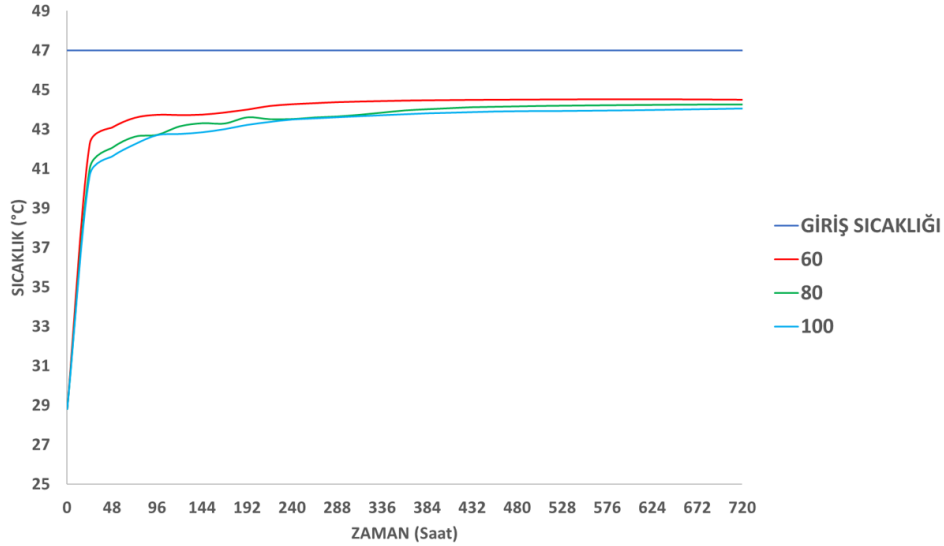
Tablo 2. Modellenen kazıkların geometrik özellikleri

KAZIK NUMARASI	KAZIK ÇAPI (m)	BORU İÇ ÇAPI (mm)	ENKESİT ALAN ORANI (HPDE BORU ALANI/BETON ALANI)
1	0.60	23	0.0059
2	0.80	30.7	0.0059
3	1.00	38.4	0.0059



Şekil 4. 1 numaralı kazık enkesit geometrisi

Kazıkların tamamına 30 gün boyunca döngü boruları içerisinde  $47^{\circ}$  sıcaklıkta su gönderilmiştir. Boru çapları farklı olduğundan kazıkların tamamında sisteme sokulan su miktarı birim zamanda  $0,2485 \text{ kg/s}$  olacak şekilde seçilmiştir. 30 günlük sürede kazıklardan çıkan döngü suyu sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



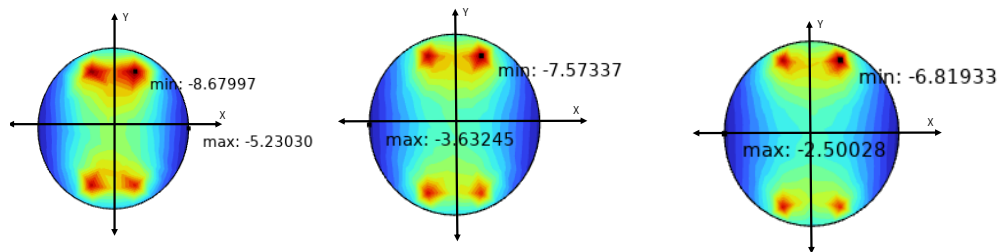
Şekil 5. Kazıklarda ısıtma sonucu döngü sıvısı çıkış sıcaklığı

Şekil 5'te görüldüğü üzere, kazıklarda enkesit boru/beton alanı oranının sabit olması durumunda kazıklarda çap artışı ile gönderilen sıcak su daha düşük sıcaklıklarda dönüş yapmaktadır. Burada  $0,6 \text{ m}$  çapında tasarlanan kazık en yüksek dönüş sıcaklığını gösterirken  $0,8$  ve  $1,0 \text{ m}$  çaplarına sahip kazıklar görece yakın dönüş sıcaklıkları sergilemişlerdir.

### 3. ANALİZ SONUÇLARININ YORUMLANMASI

#### 3.1. Kazıklarda Meydana Gelen Termal Gerilmelerin İncelenmesi

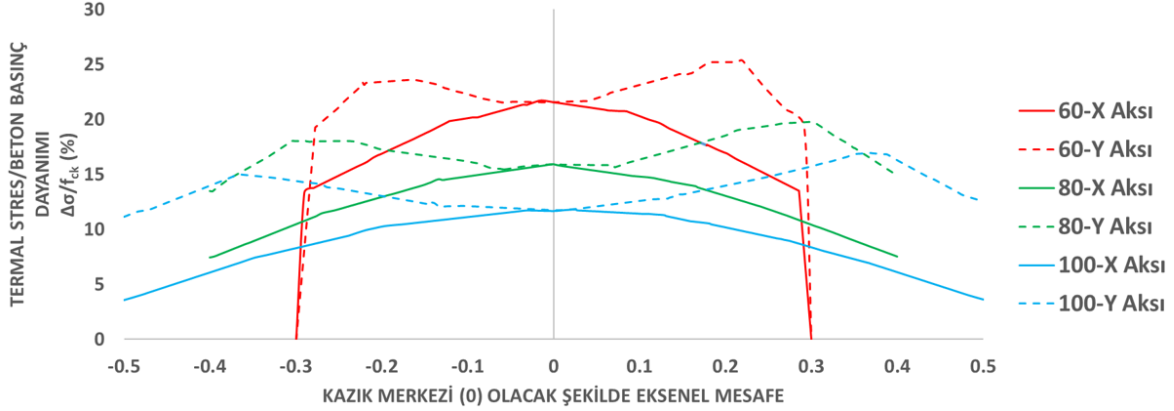
Kazıkların 30 günlük süre ile termal olarak yüklenmesi neticesinde, yapısal yüklerden kaynaklı gerilmelere ilave olarak kazıklarda termal gerilmeler meydana gelmektedir. Kazıkta meydana gelen en yüksek gerilme artışı kazığın  $0,5L$  derinliğindeki kesimine yakın gerçekleştiğinden kazık ortasında 720 saat sonunda kaydedilen gerilme miktarları Şekil 6'da verilmiştir (Kong vd., 2023).



Şekil 6. 720. saat kazık ortası gerilim değerleri (soldan sağa  $0,6 \text{ m}$ ,  $0,8 \text{ m}$  ve  $1,0 \text{ m}$  çaplı kazıklar)

Analiz sonuçlarına göre, maksimum gerilme artışları karşılaştırıldığında kazık çapının artması gerilme artışını azaltmaktadır. Şekil 6'da verilmiş olan X ve Y düzlemleri boyunca

meydana gelen gerilme değişimleri kesitte termal etki kaynaklı gerilme yığılıklarını görmek açısından önemlidir. Bu doğrultuda, X ve Y düzlemlerinin kesişim noktaları sıfır kabul edilecek şekilde kazıkların 12 metre derinlikteki kesitlerinde meydana gelen akslara göre gerilme dağılımı Şekil 7'de gösterilmiştir. Kazık basınç dayanımı 20,1 MPa olarak belirtilmiştir (Kong vd., 2023). Şekil 7 kazıklarda termal etki kaynaklı olan gerilme artışı değerinin betonun basınç dayanımı olan 20,1 MPa değerine göre yüzde oranlarını göstermektedir.



Şekil 7. Kazık 0,5L derinliğindeki kesitte meydana gelen termal gerilmenin basınç dayanımına oranı

Şekil 17'de görüldüğü üzere, kazıklarda enkesit boru/beton alanı oranı değerinde herhangi bir artış olmaksızın yapılan çap artışlarında gözlemlenen termal gerilme miktarları azalmaktadır. Analiz sonuçları kazık çapındaki artışın hem maksimum gerilme değerinde azalmaya hem de gerilme dağılımında iyileşmeye sebep olduğunu göstermektedir. 0,8 m ve 1,0 m çapındaki kazıklar görece daha yakın termal gerilme artışı değeri göstermişlerdir. Ancak her iki kazıktaki gerilmeler de 0,6 m çaplı kazık ile kıyaslandığında oldukça düşüş göstermiştir. Buradan elde edilen veriler kazık termal verimi ile değerlendirilmeli ve tasarım yargıları oluşturulmalıdır.

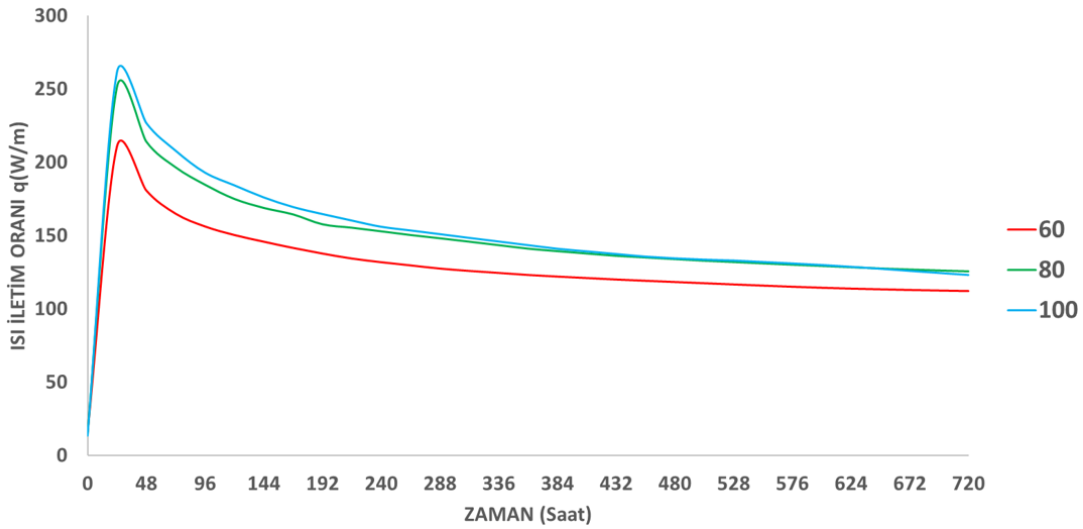
### 3.2. Kazıkların Termal Verimlerinin İncelenmesi

Geotermal enerji kazık tasarımında esas amaç enerji elde etmektir. Bu nedenle enerji kazıklarının birim uzunluğundan elde edilen enerji miktarının belirlenebilmesi çok önemlidir. Kazıkların termal veriminin tanımlanması için Eşitlik 1 ile hesaplanan "ısı iletim oranı" birimi kullanılmaktadır (Kong vd., 2023). Bu çalışmada, kazıklara birim zamanda giren su miktarı aynı olacak şekilde yapılan analizlerde kazıkların tamamı için ısıtma işlemi süresinde harcanan enerji miktarı aynı kabul edilmiştir.

$$q = m \times c_p \times (T_{iç} - T_{dış})/L_p \quad (1)$$

Kazıkların ısı iletim oranlarının zamana bağlı değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Buna göre kazıkların ilk 168 saatin ardından hesaplanan ısı iletim oranı değeri ortalamaları 0,6 m çapındaki kazık için 121,6 W/m, 0,8 m çapındaki kazık için 138,7 W/m ve 1,0 m çapındaki kazık için 140,3 W/m olarak belirlenmiştir. İlerleyen zaman ile 0,8 m çaplı kazık ile 1,0 m çaplı kazık arasında termal verim açısından fark kalmamıştır. Deneyin son saatlerinde yapılan hesaplamalarda ise 0,8 metre çapındaki kazığın ısı iletim oranı açısından daha

yüksek değer gösterdiği dahi gözlemlenmiştir. Buna göre, enkesit boru/beton alanı oranı sabit kazıklarda çapı arttırmanın verimi lineer olarak sürekli arttırmayacağı görülmüştür.



Şekil 8. Kazıkların ısı iletim oranlarının zamana bağlı değişimi

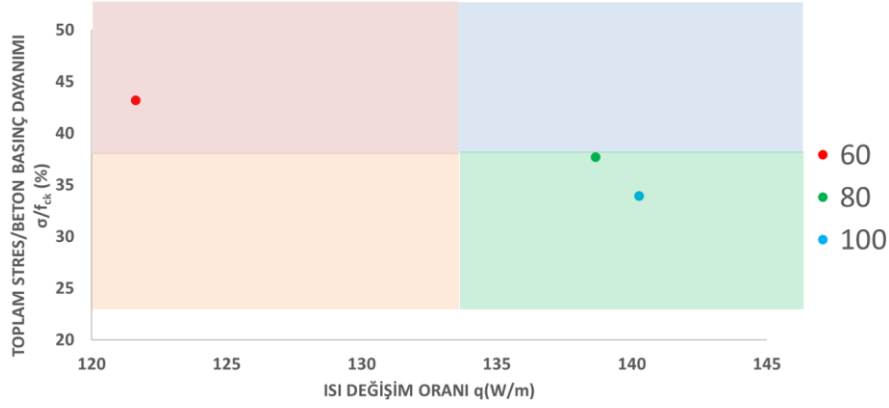
Kazıklarda gözlemlenen termal kaynaklı gerilme artışı 0,6 m çapındaki kazık için 3,97 MPa, 0,8 m çapındaki kazık için 2,97 MPa, 1,0 m çapındaki kazık için 2,33 MPa şeklindedir. Bu değerler kazıkları ısı iletim oranları ile değerlendirildiğinde 1,0 m çapında ve 0,8 m çapındaki kazıkların sunduğu termal verim seviyeleri arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir.

### 3.3. Kazıklarda Termo-Mekanik Davranışlarının Değerlendirilmesi

Geotermal enerji kazıklarının tasarımı sırasında termal verim ve bu termal verimin karşılığında kazığın maruz kaldığı termal gerilme değerleri birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, çalışmanın bu kısmına kadar elde edilen ısı iletim oranları ve termal kaynaklı gelişen maksimum gerilme değerinin yüzdece beton basınç dayanımına oranı parametresi Şekil 9'da birlikte özetlenmiştir. Buna göre, bir tasarımın amacı mümkün olduğunca grafiğin sol alt kesimine yaklaşmak olmalıdır. Şekil 9'a göre kırmızı bölge kötü kazık tasarımı bölgesini, turuncu bölge düşük verimli kazık tasarımı bölgesini, mavi bölge yüksek verimli ancak yüksek yük altında çalışan kazık tasarımı, yeşil bölge ise yüksek verim ve düşük gerilim altında çalışan ideal kazık tasarımı ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre kazık çapı artışı ile ısı iletim oranında da artış meydana gelmiştir. Kazıkta gözlemlenen gerilme artışlarında ise artan kazık çapı ile düşüş gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, özellikle 0,8 m ve 1,0 m çaplarındaki kazıklarda elde edilen neticelerin birbirine yakın olması bu artışın kazık çapı artışına paralel olarak lineer şekilde sürmeyeceğini gözler önüne sermektedir.





Şekil 9. Farklı çaptaki kazıkların termal gerilme ve ısı iletim oranı eşleşmeleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, enkesit boru/beton alanı oranının sabit olduğu durumda kazık çapının geotermal enerji kazıkların termal verimi ve maruz kaldıkları termal gerilme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak, kil zeminde imal edilmiş ve termal tepki testine tabi tutulmuş bir kazığın yer aldığı saha deneyi verilerinden yararlanarak Comsol Multyphysics 6.1 yazılımı üzerinden doğrulanmış bir FEM modeli elde edilmiştir. Doğrulanmış FEM modeli referans alınarak, enkesit boru/beton alan oranları aynı olan 3 farklı çapta geotermal enerji kazığı (dolayısıyla üç farklı boru çapında) modellenmiştir. Bu kazıklar 30 gün süre ile 47° sıcaklıkla kazığa giriş yapan döngü suyu ile termal yüke maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak hem maksimum gerilme hem de ortalama gerilme artışı yönünden kazık çapı artışı ile gerilmelerde düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca kazık çapı artışlarının kazıkta ölçülen ısı iletim oranını da arttırmaktadır. Ancak termal gerilmelerdeki ve kazık ısı iletim oranındaki çap etkisi, kazık çapı artışı ile düşüş göstermiştir. Bu durum, kazık enkesitindeki boru/beton alanı oranını sabit tutarak boyutları arttırmanın sadece belirli bir noktaya kadar verim artışı sağlayabileceğini göstermektedir.

Geotermal enerji kazıklarının termal verimliliği ve maruz kaldıkları termal gerilmeler üzerine yapılacak araştırmaların farklı zemin tiplerini ve farklı termal yükleme koşullarını kapsayacak şekilde genişletilmesi, tasarım parametrelerinin kararlaştırılması konusunda yol gösterici veriler elde edilmesi açısından yararlı olacaktır.

#### KAYNAKLAR

- Abdelaziz, S., Ozudogru, T. Y. (2016). "Non-uniform thermal strains and stresses in energy piles" Environmental Geotechnics, Vol 3(4), 237-252.
- Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., Laloui, L. (2012). "Thermo-mechanical behaviour of energy piles" Géotechnique, Vol 52(6), 503-519.
- Brandl H. (2006). "Energy Foundations and Other Thermo-Active Ground Structures" Géotechnique, Vol 56(2), 81-122.
- Di Donna, A., Rotta Loria, A. F., Laloui, L. (2016). "Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads" Computers and Geotechnics, Vol 72, 126-142.
- Erişgen, G., Bozbey, İ., Olgun, C. G. (2022), "Enerji Kazıklarının Uzun Dönem Performansı ve Tasarımı" Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Kong, G., Fang, J., Lv, Z., Yang, Q. (2023). "Effects of pile and soil properties on thermally induced mechanical responses of energy piles" Computers and Geotechnics, Vol 154.
- Laloui, L., Moreni, M., Fromentin, A., Pahud, D., Vulliet, L. (1999). "In-Situ Thermo-Mechanical Load Test on a Heat Exchanger Pile" 4th International Conference on Deep Foundation Practice.
- Rotta Loria, A. F., Gunawan, A., Shi, C., Laloui, L., Ng, C. W. W. (2015). "Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads" Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 1, 1-15.
- Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Barry-Macaulay, D., Haberfeld, C., Chapman, G., Baycan, S. (2013). "Field investigation of a geothermal energy pile: Initial observations" 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 3415-3418.
- Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Haberfeld, C. M., Barry-Macaulay, D., Baycan, S. (2015). "Posttemperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 141(4), 1 – 12.
- You, S., Cheng, X., Guo, H., Yao, Z. (2015). "Experimental study on structural response of CFG energy piles" Applied Thermal Engineering, Vol 96.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$q$	ısı iletim oranı	$m$	kütle akış hızı
$c_p$	döngü sıvısı spesifik ısı kapasitesi	$T_{iç}$	döngü suyu giriş sıcaklığı
$T_{dış}$	döngü suyu çıkış sıcaklığı	$L_p$	döngü borusu derinliği