

Değişen iklim şartlarının enerji kazığının verimine etkisinin incelenmesi

Uğur Can Erginağ¹, Semra Polat², Mert Güner³
Melis Sutman⁴, Özer Çinicioğlu⁵

ÖZET

Küresel ısınmanın önüne geçmek için birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Yer kaynaklı ısı pompasının zemin ile etkileşimde bulunan devresi olarak kullanılabilen enerji kazıkları yenilenebilir geotermal enerji kaynaklarından biri olup kullanımı son yıllarda artış göstermiştir. İklim değişikliği kaynaklı artan hava sıcaklıkları, yüzeysel zeminlerin de sıcaklığını artırmaktadır. Bu durum enerji kazıklarının servis süresi boyunca verimliliklerini etkileyebilir. Bu çalışmada bahsi geçen durum sayısal modelleme tekniği ile değerlendirilmektedir. İstanbul'da yapıldığı varsayılan bir enerji kazığının verimliliği, önceden kabul görmüş zemin verileri ile iklim değişikliğine bağlı incelenmiştir. İlk etapta 2099 yılına kadar dönemi kapsayan yüksek çözünürlüklü iklim simülasyonları ve hava sıcaklığı projeksiyonları ile gelecekteki olası hava sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında derinlik boyunca zemin sıcaklık profilleri; orta düzeyde stabilizasyon ve en yüksek konsantrasyon senaryoları için elde edilmiştir. Gerçekleştirilen üç boyutlu analizler sonucunda, iklim değişikliğinin enerji kazığından elde edilebilecek enerji miktarını, senaryo tipine bağlı olarak servis süresi boyunca %5 ila %10 arasında azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, performans katsayılarında da belirgin azalma ve üst yapı iklimlendirmesi için gerekli harici enerji miktarında artış tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji kazığı, iklim değişikliği, verim, performans katsayısı, zemin sıcaklık profili, sayısal modelleme

ABSTRACT

To prevent global warming, many countries have turned to renewable energy sources. Energy piles, which can be used as part of a ground-source heat pump system interacting with the ground, are one such renewable geothermal energy resource and their use has increased in recent years. Rising air temperatures due to climate change are also increasing the temperature of surface soils. This can affect the efficiency of energy piles throughout their service life. This study evaluates this situation using numerical modeling techniques. The efficiency of an energy pile, assumed to be located in Istanbul, has been examined with climate change considerations using validated soil data. Initially, high-resolution climate simulations and air temperature projections up to 2099 were used to determine potential future air temperatures. Based on these data, ground temperature profiles along the depth

¹ Araştırma görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, ugurcan.erginag@bogazici.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Doktora öğrencisi, the university of Edinburgh, s2765878@ed.ac.uk

³ Araştırma görevlisi, Boğaziçi Üniversitesi, mert.guner@bogazici.edu.tr

⁴ Doçent Dr., the university of Edinburgh, melis.sutman@ed.ac.uk

⁵ Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioglu@bogazici.edu.tr

were obtained for medium stabilization and highest concentration scenarios. The three-dimensional analyses revealed that climate change could reduce the amount of energy obtained from the energy pile by 5% to 10% over its service life, depending on the scenario type. Additionally, a significant decrease in performance coefficients and an increase in the external energy required for building climate control were observed.

Keywords: *Energy pile, climate change, efficiency, coefficient of performance, soil thermal profile, numerical modelling*

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, ekonomik, sosyal ve çevresel sorunlar içeren küresel bir problemdir (IPCC, 2014). Birleşmiş Milletler 2015 yılında önümüzdeki yıllarda iklim değişikliğinin neden olabileceği problemler üzerine bir yol haritası sunmuştur. Paris Anlaşması'na göre, iklim değişikliği ile mücadelede iki temel unsur yer almaktadır: sera gazına sebep olan kaynakları azaltmak ve gelecekteki iklime ve etkilerine uyum sağlamak. Birçok ülke ve uluslararası kuruluş, sera gazı emisyonlarını azaltmak için yol haritaları oluşturmaya ve iklim değişikliğinin potansiyel etkilerini azaltmaya çalışmaktadır. Bu sebeple enerji sektörü önemli bir pozisyonda olup enerji tasarrufu önlemlerinin yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynakları emisyonlarını azaltmada son derece etkili bir araçtır. Geotermal enerji son yıllarda oldukça ilgi görmektedir ve gelecek yıllarda kullanım açısından potansiyel içeren yenilenebilir teknolojilerden biridir.

Geotermal enerji, zeminin hem derin hem de sığ katmanlarında bulunan doğal enerji kaynağıdır. Yüze yakın bölgelerde mevcut geotermal enerjiden yer kaynaklı ısı pompaları (GSHP) vasıtasıyla faydalanılır. Bu sistem, konut, işyeri veya iş merkezlerinin iklimlendirme sistemlerinde, yani ısıtma ve soğutma işlemlerinde gereken enerjinin önemli bir kısmını karşılayabilir (Brandl, 2006). GSHP sistemleri arasında, enerji geoyapıları son zamanlarda ön plana çıkmaktadır. Zemin ile temas eden kazık, iksa duvarı, tünel, istasyon gibi yapılar enerji geoyapısı olarak teşkil edilebilmektedir. Tüm bu yapılar geoteknik işlevlerine göre geotermal etkileşim ile enerji yapısı olarak işlev görürler. Ancak, enerji geoyapılarının (EG) tasarımı, bakımı ve performansı, iklim değişikliğinin yol açabileceği olası değişimlerin dikkatlice göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Aksi takdirde sistemin geri ödeme süresi olumsuz biçimde etkilenebilir (Adinolfi vd., 2021). Şu ana kadar en yaygın kullanım sahası bulan EG'ler enerji kazıkları (EP'ler) olmuştur (Mohamad vd., 2021).

Enerji kazıklarında donatı kafesine sabitlenmiş borulama sistemi vardır. Bu borular üst yapı içerisine konumlandırılmış ısı pompasına bağlıdır. Borular vasıtasıyla, sıcaklığı ısı pompası ile ayarlanmış sıvı enerji kazığı içinde dolaştırılır ve böylece farklı sıcaklıktaki zemin ile termal etkileşim yaratılır. Zemin sıcaklığı yüzeye yakın ilk birkaç metrede mevsimsel değişimlerden etkilenir. Daha derinlerde ise tüm sene boyunca sabit kalır. Bu sabit sıcaklıklı bölge ile EG'ler etkileşime girerek üst yapıların yazın soğutulabilir, kışın ise ısıtılabilir. Enerji kazığının çalışma prensibi literatürde ayrıntılı biçimde anlatılmaktadır (Brandl, 2006; Bourne-Webb vd., 2019; Laloui ve Sutman, 2019; Sani et al., 2019).

Küresel ısınmanın uzun dönemde enerji geoyapılarının etkileşimde bulunduğu zemin tabakalarının ısınısını değiştireceği öngörülmektedir. Sıcaklık değişimi, kazık-temel sistemi mekanik ve termal davranışını etkilemesinin yanı sıra, kullanılacak enerji miktarını da

etkiler (Nejad ve Bernier, 2012; Fare ve Basu, 2013; Fadejev vd., 2017). Bu durum, enerji kazığının verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir.

Bahsi geçen bilgiler ışığında, bu çalışmada iklim değişikliğinin enerji kazıkları üzerindeki etkilerini verimlilik açısından incelenmektedir. Buna örnek olarak İstanbul'da 2024 yılında kullanılmaya başlanılmış ve servis ömrü 50 yıl olan fiktif bir enerji kazığı sayısal modelleme tekniği ile ele alınmıştır.

2. YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ İKLİM SİMÜLASYONLARI VE HAVA SICAKLIĞI PROJEKSİYONLARI

Küresel iklim değişimi senaryosu olarak Temsili Konsantrasyon Rotası (RCP) yaklaşımından RCP 4.5 (orta düzeyde stabilizasyon senaryosu) ve RCP 8.5 (en yüksek konsantrasyon senaryosu) kullanılmıştır (Adinolfi, 2020). 20x20 km çözünürlüğünde 23400 (180x130) gridden meydana gelen HadGEM2-ES modeline göre Türkiye için gelecek hava sıcaklığı artış projeksiyonu yaz dönemi için Tablo 1 ve Tablo 2'de takdim edilmiştir. Bahsi geçen sıcaklık artışları 1971-2000 yılları arasındaki hava sıcaklık değerlerine göre bulgulanmıştır.

Tablo 1. 1971-2000 yıllarına göre yaz dönemi beklenen sıcaklık artışı (RCP 4.5)

Yıl aralıkları	Yazarlar		
	Demircan vd. 2014	MGM 2015	Kadioğlu vd. 2017
2013-2040	1.5-2.0 °C	2.0-3.0 °C	-
2041-2070	3.0-4.0 °C	3.0-4.0 °C	-
2071-2099	4.0-5.0 °C	4.0-5.0 °C	2.0-3.5 °C

Tablo 2. 1971-2000 yıllarına göre yaz dönemi beklenen sıcaklık artışı (RCP 8.5)

Yıl aralıkları	Yazarlar		
	Demircan vd. 2014	MGM 2015	Kadioğlu vd. 2017
2013-2040	3.0 °C	3.0 °C	-
2041-2070	5.0 °C	5.0 °C	-
2071-2099	6.0 °C	>6.0 °C	4.0-6.0 °C

Kış dönemi için beklenen sıcaklık artışları Tablo 3 ve Tablo 4'te takdim edilmiştir.

Tablo 3. 1971-2000 yıllarına göre kış dönemi beklenen sıcaklık artışı (RCP 4.5)

Yıl aralıkları	Yazarlar		
	Demircan vd. 2014	MGM 2015	Kadioğlu vd. 2017
2013-2040	-	-	-
2041-2070	-	-	-
2071-2099	2.0 °C	2.0 °C	-

Tablo 4. 1971-2000 yıllarına göre kış dönemi beklenen sıcaklık artışı (RCP 8.5)

Yıl aralıkları	Yazarlar		
	Demircan vd. 2014	MGM 2015	Kadioğlu vd. 2017
2013-2040	-	-	-
2041-2070	2.0-3.0 °C	2.0-3.0 °C	-
2071-2099	3.5-4.5 °C	3.5-4.5 °C	-

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) hazırlamış olduğu iklim hava sıcaklığı projeksiyonundan elde edilmiş eğilim çizgilerinin denklemleri RCP 4.5 ve RCP 8.5

senaryoları için sırasıyla aşağıda verilmiştir. Bu denklemler yukarıda bahsi geçen referans yıl aralıklarına göre sıcaklık artış miktarını temsil eder.

$$T_{gelecek} = 0.0268 * (\text{ilgili yıl}) - 52.53 \quad (1)$$

$$T_{gelecek} = 0.0591 * (\text{ilgili yıl}) - 118.04 \quad (2)$$

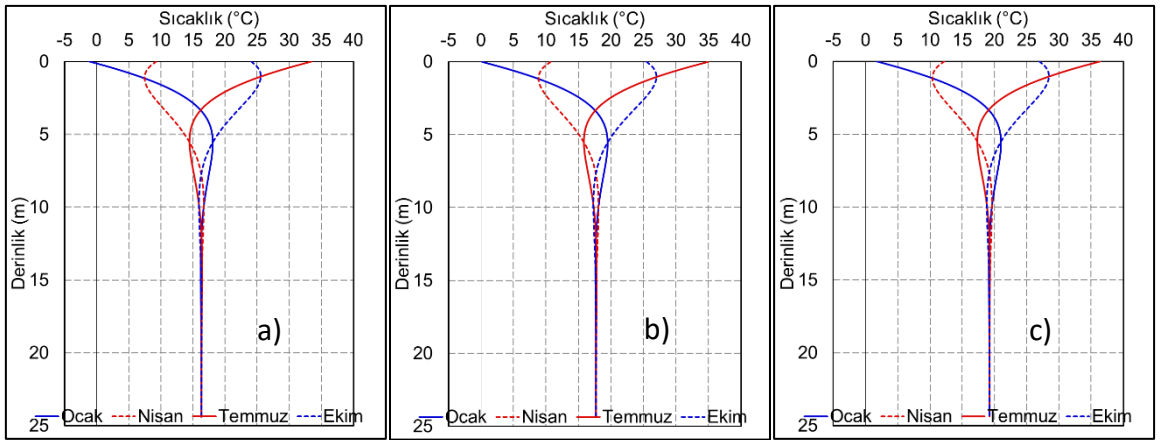
RCP 4.5 senaryosu için Denklem 1 kullanılarak elde edilen sıcaklık artış miktarı 2024 ve 2074 yılları için sırasıyla 1.7 °C ve 3.1 °C'dir. RCP 8.5 senaryosu içinse Denklem 2 kullanılarak elde edilen değerler aynı yıllar için sırasıyla 1.6 °C ve 4.5 °C'dir. Bu durum hem zemin yüzey sıcaklığını hem de sığ derinliklerdeki sıcaklıkları etkileyecek ve enerji kazığının elde edilebilecek enerji miktarını etkileyecektir. Isı transferinin büyüklüğünü enerji kazığı ile zemin sıcaklığı arasındaki termal gradiente bağlıdır (Di Donna ve Barla, 2016).

3. 2024 VE 2074 YILLARI İÇİN DERİNLİK BOYUNCA ZEMİN SICAKLIK PROFİLİ

Zemin profili içerisindeki derinlik boyunca sıcaklık dağılımı sinüsoidal olup Denklem 3'te ifade edilmiştir (Kusuda ve Achenbach, 1965).

$$T = T_{ortalama} - T_{genlik} * e^{\left[-z * \left(\frac{\omega}{2\alpha}\right)^{0.5}\right]} * \cos\left(\omega * \left[t_1 - t_2 - \frac{z}{2} * \left(\frac{2}{\omega\alpha}\right)^{0.5}\right]\right) \quad (3)$$

Bu denklemde T ile derinlikteki sıcaklığı, $T_{ortalama}$ ortalama hava sıcaklığını, T_{genlik} en yüksek ve düşük sıcaklıklar arasındaki farkı, z derinliği, α zeminin termal difüzyon katsayısını, t_1 ilgili zamanı (günü) ve t_2 ise en düşük hava sıcaklığının olduğu günü ifade eder. İstanbul için son 10 yıla ait meteorolojik verileri kullanılmış ve 2024 senesi için zemin profilinin sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (bkz. Şekil 1a). Elde edilen sıcaklık dağılımı Aydın vd. (2013)'ün yaptığı arazide ölçümler ile uyumludur. Aydın vd. (2013) zemin yüzeyinde zemin sıcaklığını Ocak ayında 2°C, Nisan ayında 12°C, Temmuz ayında 28°C ve Ekim ayında 22°C ölçmüştür. Ayrıca 8 m derinlikten sonra zemin sıcaklığının 16°C'de sabitlendiğini göstermişlerdir. Ayrıca 2074 yıl aralığına ait RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için de zemindeki sıcaklık dağılımı sırasıyla Şekil 1b ve Şekil 1c için gösterilmiştir.



Şekil 1. Zemin profili sıcaklık dağılımı a) 2024 yılı b) 2074 RCP4.5 c) 2074 RCP8.5

4. SAYISAL MODELLEME

Bir enerji kazığının termomekanik tepkisini analiz etmek için COMSOL Multiphysics Yazılımı (v6.2) kullanılarak üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli ile sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bu sayısal yaklaşım, önceki bir çalışmada detaylandırılan bir saha testi ile doğrulanmıştır (Sutman, 2016; Polat vd., 2024). Modelin boyutları x, y ve z yönlerinde sırasıyla 50 m × 50 m × 40 m olup, Şekil 2'de gösterildiği gibidir. Model, tetrahedral, üçgensel, lineer ve köşe elemanlarını içeren toplam 506636 elemandan oluşmaktadır. Bunlardan 175664 eleman, kazığı tanımlamaktadır.

Enerji kazığının çapı 0.80 m, uzunluğu 20 m olup, C40/50 betonundan yapılmıştır. Sınır etkilerini azaltmak için modelin sınırları ile enerji kazığı arasında en az 20 metrelik bir mesafe korunmuştur. Boru konfigürasyonu tek bir U şeklindedir. HDPE boruların dış çapı 30 mm olup iç çapı 20 mm'dir. İçerisinde ısı değiştirici sıvı taşıyan borular, enerji kazıklarının donatı kafeslerinin içinde yerleştirilmiştir ve bu yerleşim, yaygın saha uygulamalarıyla tutarlıdır (Mimouni ve Laloui, 2015; Sutman vd., 2019). Boru ile kazık kenarı arasındaki net açıklık 75 mm'dir.

Enerji kazığı ve zemin, izotropik olarak kabul edilmiştir. Zemin-zemin, zemin-kazık ve kazık-boru ısı transferinin tamamen doğrudan iletim şeklinde olarak modellenmiştir. Zemin profili doymuş kil olarak tek tabaka şeklinde ele alınmış ve zeminin boşluklu yapısından kaynaklı malzeme özellikleri kullanılmıştır. İzotermal koşullar altında, katı malzeme (dane) sıkıştırılmaz olarak kabul edilmekte ve katı iskeletin ataletsel etkileri göz ardı edilmiştir. Simülasyonlar, kuasistatik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bünye modeli modelleri kazık için izotropik lineer elastik iken zemin için Mohr-Coulomb'dur. Enerji kazığı ve zemin arasında herhangi bir arayüz elemanı olmayıp birbirlerine rijit olarak bağlıdır.

Sayısal modelde borular, çizgi elemanlar olarak temsil edilmiştir ve borunun üç boyutlu geometrisi ile termal parametreleri 'Borularda Isı Transfer' modülü kullanılarak atanmıştır. Borulardaki ısı taşıyıcı sıvı, %80 su ve %20 antifriz içermektedir; sıvı dolaşımı, konvektif ısı ve kütle transferi tarafından kontrol edilmektedir.

Başlangıç ve Sınır Koşulları

Modelin tabanı ankastredir. Model yan yüzeylerinde kayar mesnet uygulanırken, yerçekimi doğrultusunda ise serbest bırakılmıştır (bkz. Şekil 2). Enerji kazığı ve çevresindeki zeminin başlangıç sıcaklıkları, İstanbul, Türkiye'deki iklim koşullarına dayanarak belirlenmiş ve toprak derinliği boyunca sabit kabul edilen yıllık ortalama zemin sıcaklığı 16.3°C olarak alınmıştır (Aydın vd., 2013). Modelin yan yüzeylerine ve tabanına termal yalıtım uygulanmıştır. Başlangıç gerilme durumu için zeminde sükunet durumu, kazık için ise kendi ağırlığı tarafından meydana gelen gerilmeler ele alınmıştır. Kazık üzerindeki tek mekanik yük, kendi ağırlığıdır.

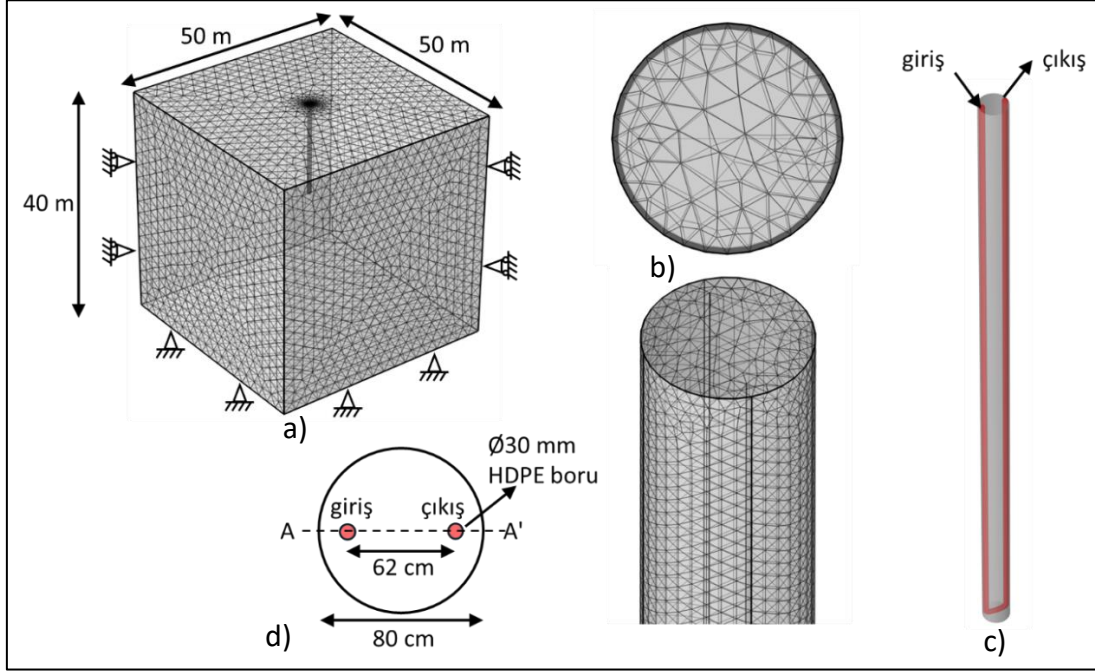
Enerji kazığı için boru giriş sıcaklığını seçmek, termomekanik özellikler üzerindeki potansiyel etkisi nedeniyle önemlidir (Laloui ve Rotta Loria, 2020). Maksimum potansiyel etkileri değerlendirmek amacıyla giriş sıcaklığı 45°C olarak sabitlenmiştir. Bu sıcaklık, literatürde sıkça belirtilen temsil eder ve potansiyel termal yüklemeye koşullarını kapsamlı bir şekilde

temsil eder (Bourne-Webb vd., 2009; Faizal vd., 2019; Rotta Loria ve Laloui, 2018). Bu şekilde üst yapının soğutulmasını (yaz sezonunda) sağlar.

Modelde analizi 90 günlük süreç (yaz sezonu) ele alınmıştır. Isı taşıyıcı sıvının hızı 0.7 m/s olarak korunmuştur. Kazık ve zemin malzeme özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Zemin termal özellikleri ortalama bir kile göre seçilmiştir (Laloui ve Rotta Loria, 2020).

Tablo 2. Kazık ve zemin malzeme özellikleri

Özellikler	Kil	Kazık
Elastik modül, E (MPa)	45	35200
Poisson oranı, ν	0.495	0.2
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	2000	2400
Spesifik ısı kapasitesi, C_p (MJ/m ³ °C)	2.25	1.90
Termal iletkenlik, λ (W/m°C)	2.0	1.5
Termal genişleme katsayısı, η ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	15	10
Kohezyon (kPa)	100	-

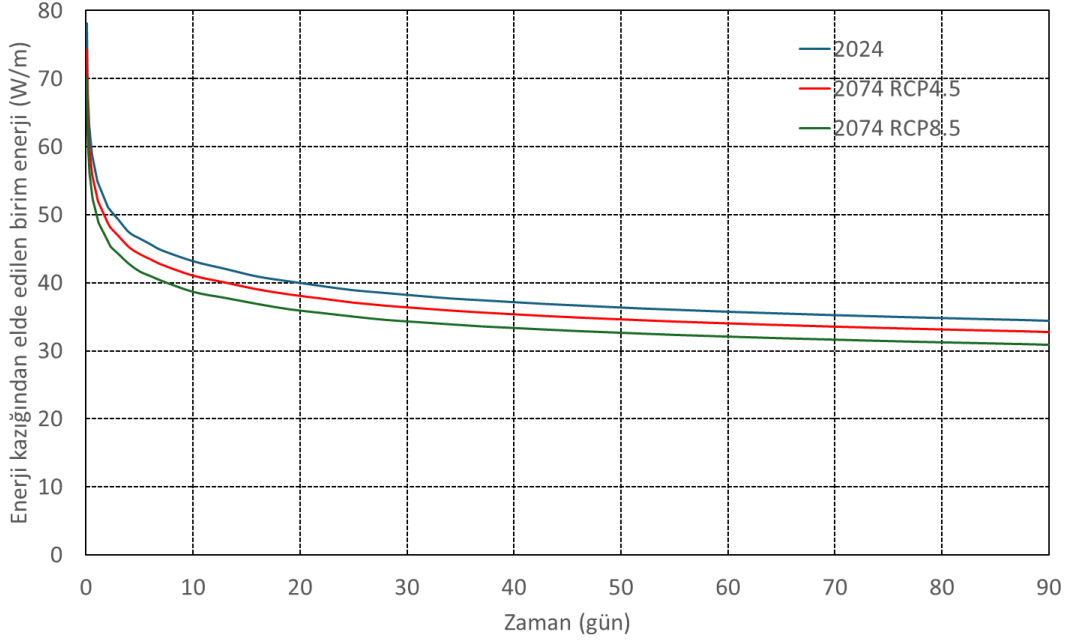


Şekil 2. Sayısal model a) 3 boyutlu sayısal model b) kazık ağ elemanları c) tekli U tipi boru d) kazık enkesiti

5. SAYISAL MODEL SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada yaz dönemi ele alınmıştır. İkinci bölümde görülebileceği gibi kış dönemi için yapılan iklim projeksiyonlarında bulgularanan hava sıcaklık tahminlerinde geoteknik açıdan önemli bir artış olmadığı sonucuna varılmıştır. Yapılan üç boyutlu sayısal analizlerin sonucu Şekil 3'te takdim edilmiştir. Bahsi geçen şekil, kazık birim uzunluğu için zeminden elde edilebilecek enerjiyi göstermektedir. Beklenildiği gibi zemini ısıtma operasyonu başladığı ilk zamanlarda sıcaklık farkı kazık ile zemin arasında en yüksek durumda olduğu için zeminden elde edilebilecek enerji kazanımı da en yüksek durumdadır. Kazık zamanla etrafındaki zemini ısıttığı için elde edilebilecek enerji kazanımı azalmaktadır. Ele alınan 2074 RCP4.5 senaryosunda zeminden elde edilebilecek enerji miktarı 2024 yılına göre %5.1

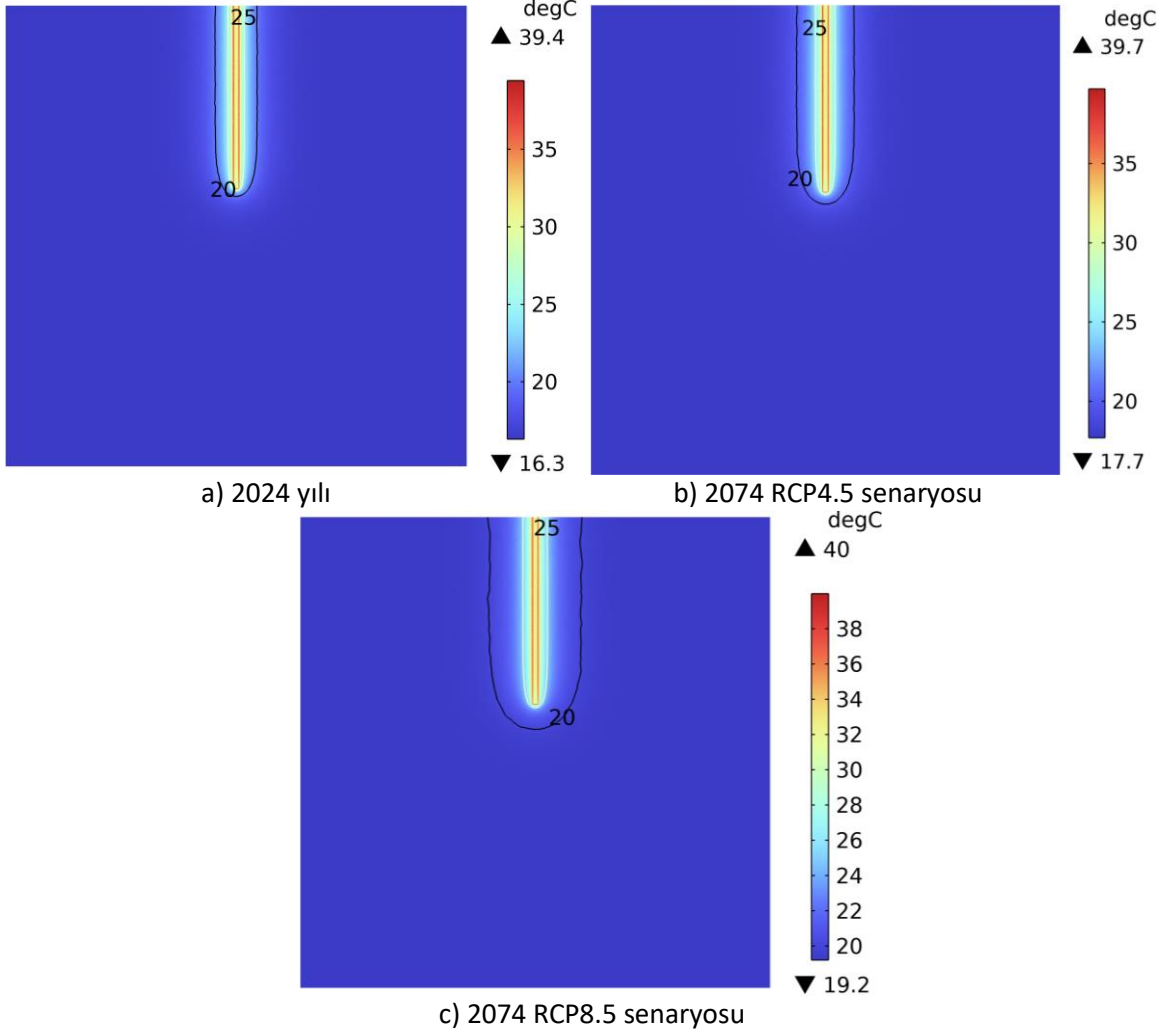
oranında daha azdır. Benzer şekilde en olumsuz durum olan 2074 RCP8.5 senaryosunda ise bu oran %10.2'dir. Bu durum zeminden elde edilen enerji için söz konusudur.



Şekil 3. Yaz dönemi enerji kazılarından farklı senaryolara göre elde edilebilecek enerji miktarı

GSHP tasarımında ilk etapta hedef bir performans katsayısı (COP) belirlenir ve binanın iklimlendirilmesi için gerekli ilave enerji miktarı ona göre belirlenir. COP ısı pompası operasyonundan sonra elde edilen toplam enerjinin, ısı pompası operasyonu için gerekli harici enerjii miktarına oranıdır. Bu oran GSHP sistemleri için 3.5-4 aralığındadır (Laloui ve Lotta Loria, 2020). COP'in 4 olduğu durumda 3 birim enerji zemin-kazık termal etkileşiminden alınırken 1 birim ise harici olarak dışarıdan temin edilir. Toplam 4 birim enerjinin dışarıdan alınan enerjiye oranı 4'tür. Örneğin, bu çalışmada ele alınan durum için (2024 yılı COP=4) 2074 yılına geldiği zaman RCP4.5 senaryosu için 3.47 değerine düşmektedir. RCP8.5 senaryosu içinse bu oran 3.08'e kadar düşmektedir. Bu hesaplama üst yapının sabit enerji ihtiyacına göre yapılmıştır. Gerçekte ise küresel ısınmadan dolayı üst yapının soğutma ihtiyacı artacağı için nihai COP değeri hesaplanandan çok daha düşük olacak ve sistem verimliliği azalacaktır.

Küresel ısınmanın neticesinde zemindeki sıcaklık dağılımının değişimi Şekil 4'te görülebilir. İlgili şekil zemini ısıtma operasyonuna başlangıçtan 90. gününü (yaz dönemi bitişi) göstermektedir. İklim değişikliğinden ötürü farklı senaryolara göre zeminde ısınan bölge daha fazla genişleyebilir (bkz. Şekil 4c). Bu durumda GSHP sistemlerinin verimliliğini düşürmeye sebep olacaktır. Olası bir kazık grubunda ise kazıklar arası termal etkileşimden ötürü durum daha da elverişsiz olabilir



Şekil 4. Yaz dönemi enerji kazığından farklı senaryolara göre zemin sıcaklık dağılımı (°C)

6. SONUÇLAR

İklim değişikliğinin yarattığı ve yaratacağı problemleri azaltmak için ortaya konulan çözüm yollarından birisi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan jeotermal enerji yakın geçmişte popülerliğini arttırmaya başlamıştır. Yer kaynaklı ısı pompası sistemleri (enerji kazıkları) jeotermal enerji grubunun kollarından biri olup üst yapı iklimlendirmesi gerekli enerjinin bir kısmının zeminden temin edilebilmesine sığ derinliklerde dahi olanak sağlar. Enerji kazıklarının tasarımında belirli bir verimlilik (COP) hedeflenir. Fakat iklim değişikliğinin zeminde neden olabileceği etkilerden dolayı enerji kazıklarının performansı ve verimliliği servis süresince değişkenlik gösterebilir.

Bu çalışmada enerji kazığının verimliliğinin iklim değişikliğine bağlı değişimi, sayısal modelleme tekniği ile varsayılan bir örnek ile incelenmiştir. Öncesinde kabul görmüş (Polat vd., 2024) bir sayısal modeldeki veriler ve modelleme tekniği ile İstanbul'da yapıldığı varsayılmış bir kazık modellenmiştir. Ayrıca, literatürde Türkiye için yapılmış iklim simülasyonları ve hava sıcaklığı projeksiyonları ile kazık servis süresi boyunca kış ve yaz sezonları için gelecekteki (50 yıl servis süresi) hava sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında İstanbul'da gelecekte olabilecek zemindeki sıcaklıkların derinliğe bağlı değişimi

hesaplanmıştır. Üç boyutlu sayısal çözümler neticesinde 2074 RCP4.5 (orta düzeyde stabilizasyon) senaryosunda enerji kazıklarından elde edilebilecek enerji miktarında zamana bağlı %5 azalma olacağı ve başlangıçta 4 olan performans katsayısının (COP) 3.47'e düşeceği bulgulanmıştır. Bu durum 2074 RCP4.5 (en yüksek konsantrasyon) senaryosu için ise %10 daha düşük enerji kazanımı ve 3.08'e kadar azalan COP'ye neden olmuştur. Bahsi geçen enerji kazanımlarındaki düşüşler sadece zemin-kazık durumu için geçerlidir. Üst yapının artan sıcaklığa bağlı olarak iklimlendirmek için gerek duyacağı enerjinin artışını da hesaba katılma durumunda yukarıda bahsi geçen COP değerlerini daha da aşağı çekebilir. Bu sebeple enerji kazıklarının tasarımında, servis süresi boyunca iklim değişikliğinin hesaba katılması ekonomik tasarım açısından önemlidir. Ayrıca, zemin-kazık termal etkileşimine ek olarak iklim değişikliğinden kaynaklı zemindeki ısı artışı, sıcaklığı artan hacimlerin artmasına ve bundan dolayı kazık verimliliğinin azalmasının etkisinin olduğu saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aydın, M., Şişman, A., Dinçer, Ş., & Gültekin, A. (n.d.). Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Isıl Cevap Testi ve Kuyu Performansının Analitik Öngörüsü.
- 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", *Geotechnique*, 59(3), 237–248. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>.
- Bourne-Webb, P.J., Bodas Freitas, T.M., Freitas Assunção, R.M. (2019). "A Review Of Pile-Soil Interactions In Isolated, Thermally-Activated Piles" *Computers and Geotechnics*, Vol. 108, pp. 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.008>.
- Brandl, H. (2006). "Energy Foundations and Other Thermo-Active Ground Structures", *Geotechnique*, 56(2), 81–122.
- Burger, A. (1985), "Thermique des Nappes Souterraines". Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Switzerland (in French).
- COMSOL Multiphysics® v. 6.2. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Yazici, B., Eskioğlu, O., Tuvan, A., Akçakaya, A. (2014), "72 Climate Change Projections for Turkey with New Scenarios. The Climate Change and Climate Dynamics Conference, İstanbul.
- Di Donna, A., Barla, M. (2016), "The role of ground conditions on Energy Tunnels' Heat Exchange", *Environmental Geotechnics*, 3(4), 214–224. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00030>.
- Eslami-nejad, P., Bernier, M. (2012), "Freezing of Geothermal Borehole Surroundings: A Numerical and Experimental Assessment with Applications", *Applied Energy*, 98, 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.047>.
- Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J., Haghigat, F. (2017), "A Review on Energy Piles Design, Sizing and Modelling", *Energy*, Vol. 122, 390–407. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097>
- Faizal, M., Bouazza, A., McCartney, J.S., 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*, 145(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002147](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002147)
- Ghasemi-Fare, O., Basu, P. (2013), "A Practical Heat Transfer Model for Geothermal Piles", *Energy and Buildings*, 66, 470–479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.048>.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team Pachauri RK, Meyer LA (eds)). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kadioğlu, M., Ünal, Y., İlhan, A., Yürük, C. (2017), "Climate Change and Agricultural Sustainability in Turkey", 8th Atmospheric Sciences Symposium , İstanbul, 369-371.
- Kusuda, T., Achenbach, P.R. (1965), "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the US", ASHRAE transactions, Vol. 71, 61-75.
- Laloui, L., Sutman, M. (2019), "Energy Geostructures: a New Era for Geotechnical Engineering Practice", XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iceland, 1-15.
- Laloui, L., Rotta Loria, A.F. (2020), "Analysis and Design of Energy Geostructures", Academic Press.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü (2015), "Yeni Senaryolar İle Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği", Meteoroloji Genel Müdürlüğü Matbaası.
- Mimouni, T., Laloui, L. (2015), "Behaviour of a Group of Energy Piles", Canadian Geotechnical Journal, 52(12), 1913–1929. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0403>
- Mohamad, Z., Fardoun, F., Meftah, F. (2021), "A review on Energy Piles Design, Evaluation, and Optimization". Journal of Cleaner Production, Vol. 29, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125802>.
- Polat, S., Guner, M., Erginag, U.C, Sutman, M., Cinicioglu, O (in press). "Analyses of Thermo-Active Piles Considering Surface Radiation and Wind Convection Effects." Int. Journal of Geomechanics.
- Rotta Loria, A.F., Laloui, L. (2017), "Serviceability Assessment of Energy Pile Groups Through Design Charts", 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- Rotta Loria, A. F., Laloui, L. (2018), "Group Action Effects Caused by Various Operating Energy Piles", Geotechnique, 68(9), 834–841. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.213>
- Sani, A.K., Singh, R.M., 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, pp. 54–78). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>.
- Sutman, M., (2016), "Thermo-mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling", PhD. Dissertation, Blacksburg.
- Sutman, M., Brettmann, 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, 18, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.08.002>.