Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ENERJİ KAZIKLARINDA TEĞETSEL ÇEKME GERİLMELERİ VE TASARIMA ETKİSİ

TENSILE HOOP STRESSES IN ENERGY PILES AND THEIR EFFECT ON DESIGN

Uğur Can ERGİNAĞ[1], Mert GÜNER[1], Semra POLAT[2]
Melis SUTMAN[3], Özer ÇİNİCİOĞLU[4]

ÖZET

Enerji kazıkları, üst yapı yüklerini zemine aktararak yapısal stabilite sağlama ve sığ jeotermal enerjiden yararlanma gibi iki temel işlevi bir arada görür. Bu nedenle tasarımlarında hem yapısal hem de termal yüklerin dikkate alınması gerekir. Ancak mevcut uygulamalar çoğunlukla termal yüklerin yalnızca eksenel bileşenleriyle sınırlıdır. Bu çalışma, termal yüklerin üç boyutlu etkilerini, özellikle beton paspayı tabakasında oluşan teğetsel (hoop) çekme gerilmelerine odaklanarak incelemektedir. Sayısal modelleme ile bu gerilmelerin konumsal ve zamansal değişimleri analiz edilmiş, ortaya çıkış mekanizmaları açıklanmıştır. Bulgular, enerji kazıklarının işletimi sırasında paspayı betonunda kayda değer teğetsel çekme gerilmeleri oluştuğunu; bu gerilmelerin mevsimsel işletim değişikliklerine bağlı olarak yer değiştirdiğini ve etkilenen bölgenin genişlediğini göstermektedir. Bu nedenle, teğetsel gerilmelerin tasarım sürecine dâhil edilmesi, yapısal bütünlük ve dayanıklılık açısından kritik önem taşımaktadır. Ayrıca malzeme özellikleri, geometri, işletim koşulları ve iklim gibi parametrelerin değiştirildiği bir hassasiyet analizi yapılmış, bu parametrelerle teğetsel gerilmeler arasındaki ilişki ortaya konmuş ve elde edilen bulgulara dayalı tasarım önerileri sunulmuştur.
Anahtar Kelimeler: *Teğetsel gerilmeler, beton çekme dayanımı, enerji kazıkları, beton paspayı, termal gerilmeler, hassasiyet analizi*

ABSTRACT

Energy piles serve two primary functions: transferring superstructure loads to the ground to ensure structural stability and harnessing shallow geothermal energy. Therefore, both structural and thermal loads must be considered in their design. However, current practices are mostly limited to the axial components of thermal loads. This study investigates the three-dimensional effects of thermal loads, focusing specifically on hoop (tangential) tensile stresses in the concrete cover. Through numerical modeling, the spatial and temporal variations of these stresses are analyzed, and the underlying mechanisms are explained. The findings show that significant tangential tensile stresses develop in the concrete cover during the operation of energy piles, and that these stresses shift in location depending on seasonal operational changes, while the affected zone expands. Consequently, incorporating tangential stresses into the design process is critical for ensuring structural integrity and durability. Additionally, a sensitivity analysis was conducted by varying parameters such as material properties, geometry, operational conditions, and climate. The relationship between these parameters and hoop stresses was identified, and design recommendations based on the findings are presented.
Keywords: *Hoop stresses, concrete tensile capacity, energy piles, clear concrete cover, thermal stresses, sensitivity analysis*

[1] Dr. Araş. Gör., Boğaziçi Üniversitesi, ugurcan.erginag@bogazici.edu.tr
[1] Dr. Araş. Gör., Boğaziçi Üniversitesi, mert.guner@bogazici.edu.tr
[2] Dr. Adayı, The University of Edinburgh, S.Polat@sms.ed.ac.uk
[3] Assoc. Prof. Dr., The University of Edinburgh, melis.sutman@ed.ac.uk
[4] Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioglu@bogazici.edu.tr

1. GİRİŞ

Enerji kazıkları, geleneksel derin temel elemanlarının taşıyıcı işlevini sığ jeotermal enerji değişimi ile birleştiren enerji geoyapılarıdır (Bourne Webb vd., 2009; Laloui vd., 2020). Kazık içerisine yerleştirilen ısı değiştirici borularında dolaşan akışkan ile kazık ve çevre zemini arasında ısı alışverişi gerçekleştirilir. Böylece aynı temel elemanı hem yapısal yükleri taşır hem de ısıtma-soğutma sisteminin bir parçası olarak görev yapar. Enerji kazıklarının davranışı; ısı transferi (Kong vd.; 2019, Li vd., 2021), farklı iklim koşulları altındaki performası (Loveridge vd., 2020; Sutman vd., 2020), kullanılan malzemelerin etkisi (Mousa vd., 2020; Cecinato vd., 2022), kazık grup etkisi (Rotta Loria vd., 2017; Ravera vd., 2024), tasarım ile optimizasyon tesirleri (Park vd., 2015; Carotenuto vd., 2017; Fadejev vd., 2017), uzun dönem performansı (Adinolfi vd., 2018; Sutman vd., 2020) ve termal olarak indüklenen gerilmeler (Abdelaziz vd., 2016; Faizal vd., 2016; Sutman vd., 2019; Faizal vd., 2022; Moradshahi vd., 2021; Polat vd., 2025) gibi birçok açıdan araştırılmıştır.

Termal yükleme altındaki enerji kazıklarında, kesit içerisinde homojen olmayan ve zamana bağlı sıcaklık dağılımları neden olur (Abdelaziz vd., 2016; Zhou vd., 2024). Isı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı kazık betonundan farklı olduğunda boru çevresindeki beton bölgesi diğer bölgelere göre daha hızlı ısınmak veya soğumak ister. Ancak bu deformasyon çevredeki daha soğuk veya daha sıcak beton tarafından kısıtlandığından, serbest termal deformasyon yerine kısıtlanmış (blocked) birim deformasyon meydana gelir ve iç gerilmeler oluşur (Faizal vd., 2018; Fang vd., 2020). Geleneksel tasarımda özellikle eksenel termal gerilmeler dikkate alınırken, radyal gerilmelerin çoğu durumda kritik olmadığı kabul edilmektedir (Fazial vd., 2019; Lv vd., 2020). Buna karşın çevresel veya teğetsel doğrultudaki gerilmeler (Erginağ vd., 2025; Güner vd., 2026), enerji kazıklarının üç boyutlu termal davranışının önemli bir bileşenidir.

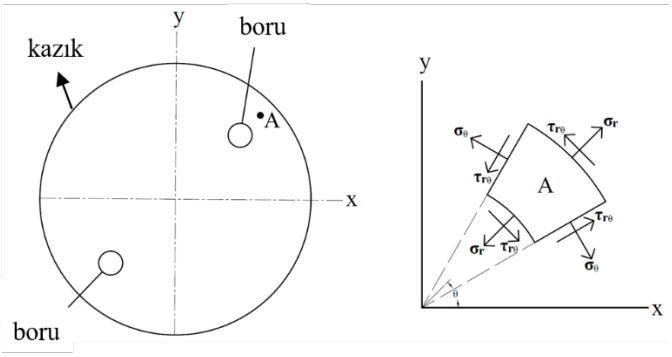
Bu çalışmanın temel amacı, enerji kazıklarında donatısız beton örtüsü (paspayı) içerisindeki teğetsel termal gerilmelerin oluşum mekanizmasını ve büyüklüğünü belirlemektir. Doğrudan saha ölçümü yapılmasının yapım koşulları nedeniyle güç olması sebebiyle, çalışma doğrulanmış üç boyutlu sayısal model ve analitik elastisite çözümü üzerine kurulmuştur (Polat vd., 2025). Ayrıca donatı ve mekanik yüklerin teğetsel gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiş ve termal açıdan kesit tesirlerini etkileyen unsurlar hassasiyet analizleri ile belirlenmiştir.

2. TERMAL GERİLME OLUŞMA MEKANİZMASI

Bir malzeme ısıtıldığında genleşir, soğutulduğunda ise büzülür. Bu termal deformasyon tamamen veya kısmen kısıtlandığında serbest termal birim deformasyon gelişemez ve buna karşılık gelen iç gerilmeler oluşur. Basitleştirilmiş tek boyutlu yaklaşımda termal gerilme, elastisite modülü ile kısıtlanmış termal birim deformasyonun çarpımıyla ilişkilidir (Laloui vd., 2020). Enerji kazıklarında bu mekanizma yalnızca kazık ekseni doğrultusunda değil, kesit düzleminde de meydana gelir.

Silindirik koordinat sistemi kullanıldığında normal gerilmeler eksenel, radyal ve teğetsel olmak üzere üç bileşene ayrılır. Teğetsel gerilme, kazık eksenine dik kesitte teğetsel doğrultuda etkimektedir ve bu çalışmada hoop gerilmesi olarak adlandırılmıştır. Isıtma sırasında boru çevresindeki beton önce ısınarak genleşmeye çalışır; çevredeki daha soğuk beton bu genleşmeyi sınırlar. Bunun sonucunda özellikle beton örtüsünün dış kesimlerinde

çekme, borulara yakın iç kesimlerde ise basınç gerilmeleri oluşabilir. Soğutma durumunda ısı akışının yönü tersine döner ve gerilme dağılımı da tersine çevrilir.



Şekil 1. 'A' elemanındaki termal gerilme durumu

Bu mekanizma nedeniyle enerji kazığının aynı beton kesiti işletme çevriminin farklı aşamalarında hem çekme hem basınç gerilmesine maruz kalabilir. Ayrıca teğetsel termal gerilmenin büyüklüğü yalnızca sıcaklık farkına değil, sıcaklık gradyanının kesit içerisindeki dağılımına, bu gradyanın gelişme hızına ve beton-zemin sisteminin termo-mekanik özelliklerine bağlıdır. Kaynak çalışmanın yaklaşımında, bu temel mekanizma üç boyutlu termo-mekanik sonlu eleman analizi ile doğrudan modellenmiştir.

3. TERMAL GERİLME OLUŞMA MEKANİZMASI

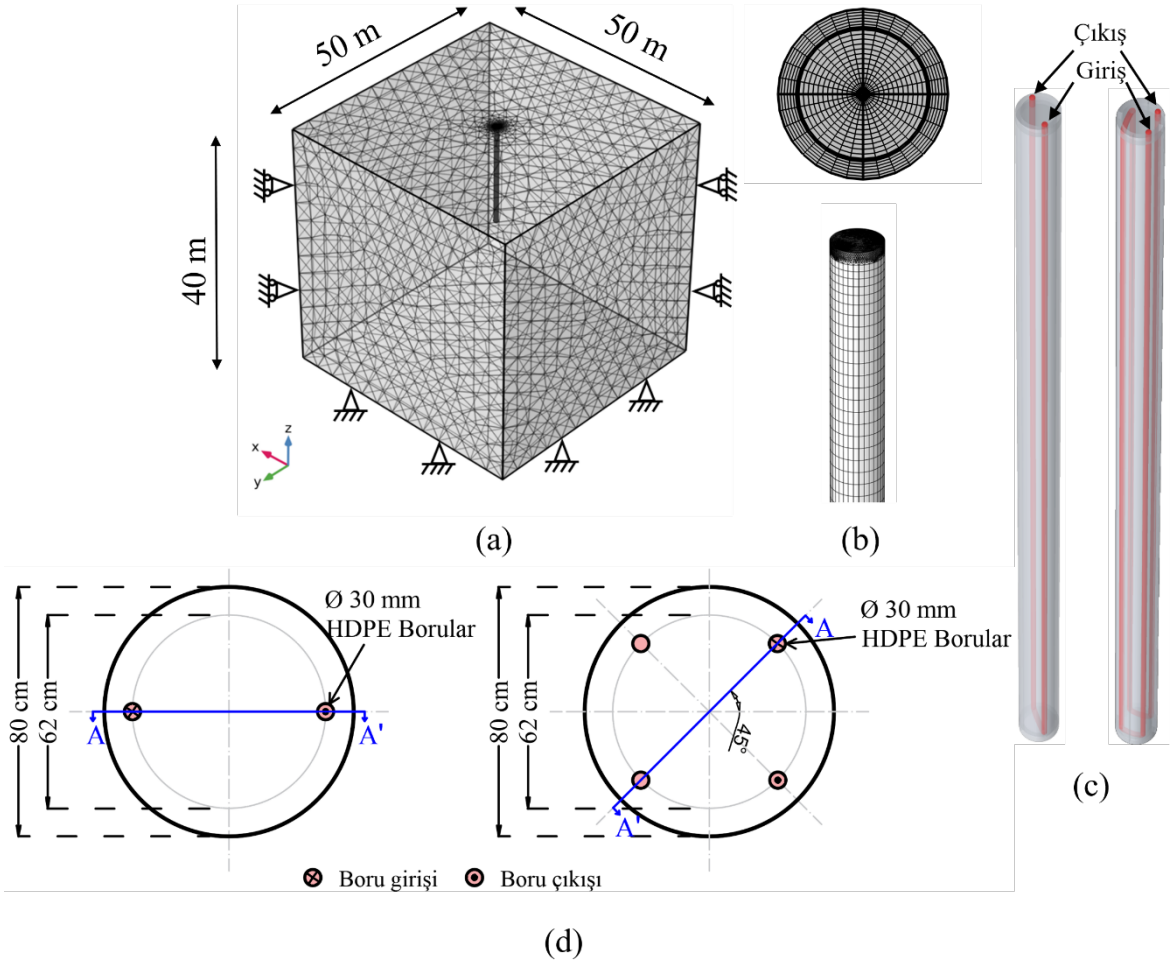
Enerji kazığının termo-mekanik davranışı COMSOL Multiphysics 6.3 kullanılarak üç boyutlu sonlu eleman yöntemi ile modellenmiştir (bkz. Şekil 2). Bu sayısal yaklaşım daha önce gerçekleştirilmiş tam ölçekli bir saha deneyi kullanılarak doğrulanmıştır (Polat vd., 2025). Modelde enerji kazığı ve zemin izotropik kabul edilmiş, zemin profili tek tabakalı doygun kil olarak idealize edilmiştir. Kazık doğrusal elastik ve izotropik malzeme olarak, zemin ise Mohr-Coulomb modeli ile tanımlanmıştır. Kazık-zemin ara yüzeyinde tam aderans kabul edilmiş ve ayrı ara yüzey elemanları kullanılmamıştır (Rotta Loria vd., 2018; Batini vd., 2015).

Model boyutları x, y ve z doğrultularında sırasıyla 50 m × 50 m × 40 m'dir. Sonlu eleman ağı toplam 871582 elemandan oluşmakta ve bunun 611327 elemanı kazığı temsil etmektedir. Kazık çapı 0.80 m, boyu 20 m ve beton sınıfı C40/50'dir. Isı değiştirici olarak nominal çapı 25.4 mm, et kalınlığı 3.2 mm olan HDPE borulardan oluşan tek U biçimli boru sistemi kullanılmıştır. Borunun dış yüzeyi ile kazık çevresi arasındaki net beton örtüsü kalınlığı 7.5 cm'dir. Model sınırlarının kazıktan en az 20 m uzakta tutulması ile sınır etkileri azaltılmıştır.

Referans modelde doygun kilin elastisite modülü 45 MPa, Poisson oranı 0.495, birim hacim ağırlığa karşılık gelen yoğunluğu 2005 kg/m³, ısıl iletkenliği 2.0 W/(m°C) ve drenajsız kayma dayanımı 110 kPa'dır. Kazık betonunda elastisite modülü 35.2 GPa, Poisson oranı 0.20, yoğunluk 2400 kg/m³ ve ısıl iletkenlik 1.5 W/(m°C) alınmıştır. Betonun doğrusal ısıl genleşme katsayısı 10 με/°C'dir. İstanbul için başlangıç zemin sıcaklığı 16.3°C olarak kabul edilmiştir. Referans durum için tüm malzeme özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Model tabanında düşey ve yatay deplasmanları tamamen kısıtlayan ankastre sınır koşulu, yan yüzeylerde yatay deplasmanları kısıtlayan kayar mesnet sınır koşulları ve üst yüzeyde serbest sınır koşulu uygulanmıştır. Modelin yan ve alt sınırlarında ısı yalıtımı kullanılmıştır.

Referans işletme koşullarında ısıtma için boru giriş sıcaklığı 45°C, soğutma için 5°C ve akışkan hızı 0.7 m/s alınmıştır. Analiz süresi 90 gün olup başlangıç döneminde daha sık zaman adımları kullanılmıştır.



Şekil 2. Sayısal modelin sonlu eleman ağı: (a) 3B görünüş; (b) kazık ağı detayı; (c) U ve W biçimli boru konfigürasyonları; (d) enerji kazığı, boru konfigürasyonları ve kesit eksenlerinin plan görünüşü

Tablo 1. Referans durumu için malzeme özellikleri

Parametre	Zemin	Kazık
Elastisite modülü, E	45 MPa	35.2 GPa
Poisson oranı, ν	0.495	0.20
Yoğunluk, ρ	2005 kg/m³	2400 kg/m³
Isıl iletkenlik, λ	2.0 W/(m°C)	1.5 W/(m°C)
Özgül ısı kapasitesi, Cp	2.25 MJ/(m³°C)	1.90 MJ/(m³°C)
Isıl genleşme katsayısı, α	15 με/°C	10 με/°C
Drenajsız kayma dayanımı	110 kPa	—

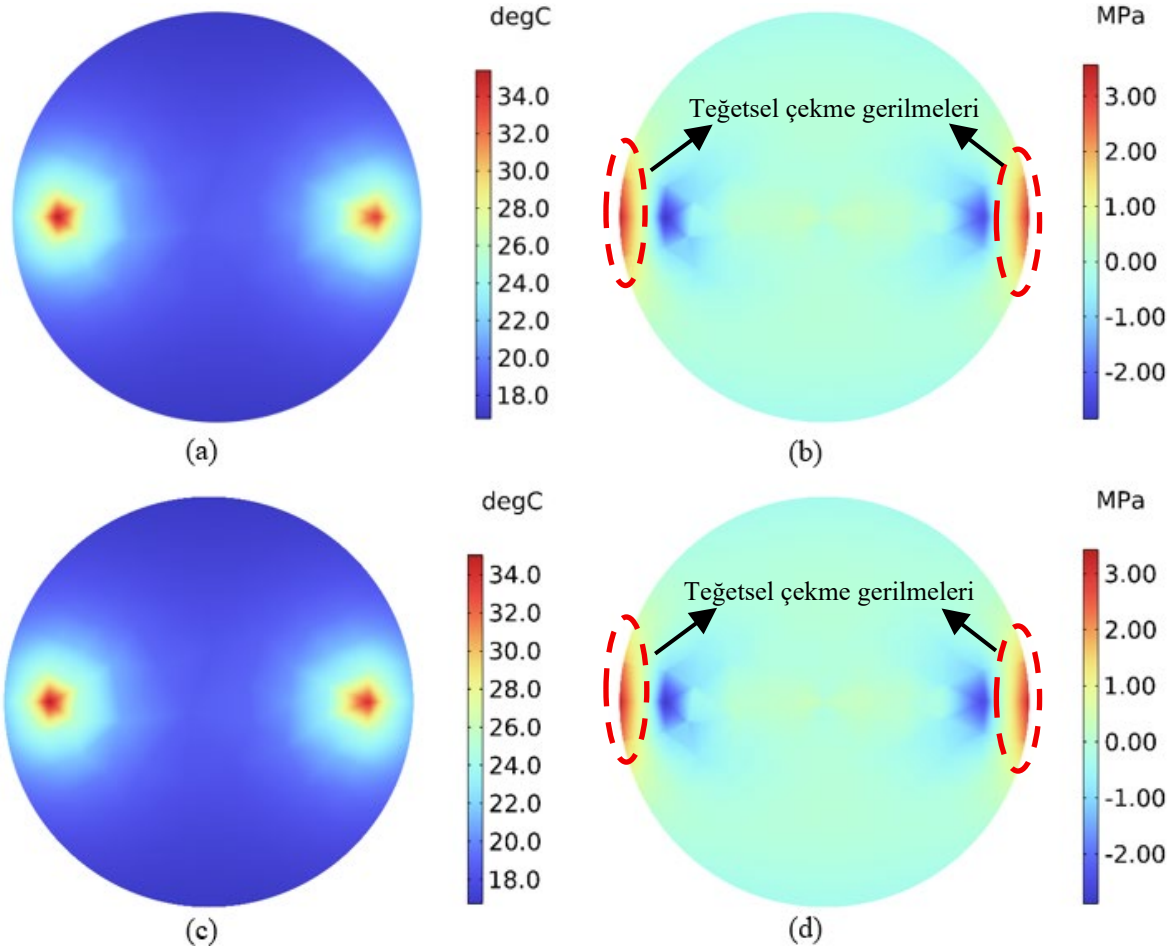
4. TERMO-MEKANİK FORMÜLASYON VE REFERANS DURUM İÇİN SONUÇLAR

Kullanılan nümerik hesap yaklaşımı mekanik denge, termoelastik gerilme ve enerji korunumu denklemlerini birlikte çözmektedir. Zemin ve kazık içerisindeki ısı transferi

iletim yoluyla, boru içerisindeki akışkanın enerji taşınımı ise taşınım ve ısı değişimi mekanizmalarıyla modellenmiştir. Toplam gerilme tensörü, elastik gerinim ile termal gerinimin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilmektedir. Böylece zamana bağlı sıcaklık alanı ile mekanik gerilme alanı arasında termo-mekanik ilişki kurulmuştur.

Isıtma ve soğutma senaryolarında sıcaklık gradyanlarının en belirgin olduğu bölge, ısı değiştirici boruları ile kazık çevresi arasındaki beton paspayıdır. Bu bölgedeki termal genleşme veya büzülmenin etrafındaki beton tarafından kısıtlanması teğetsel gerilmelerin temel kaynağıdır. Referans modelde 45°C giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilen yaz sezonu operasyonu, 5°C giriş sıcaklığı ile gerçekleştirilen kış sezonu operasyonu göre daha kritik sonuçlar üretmiştir.

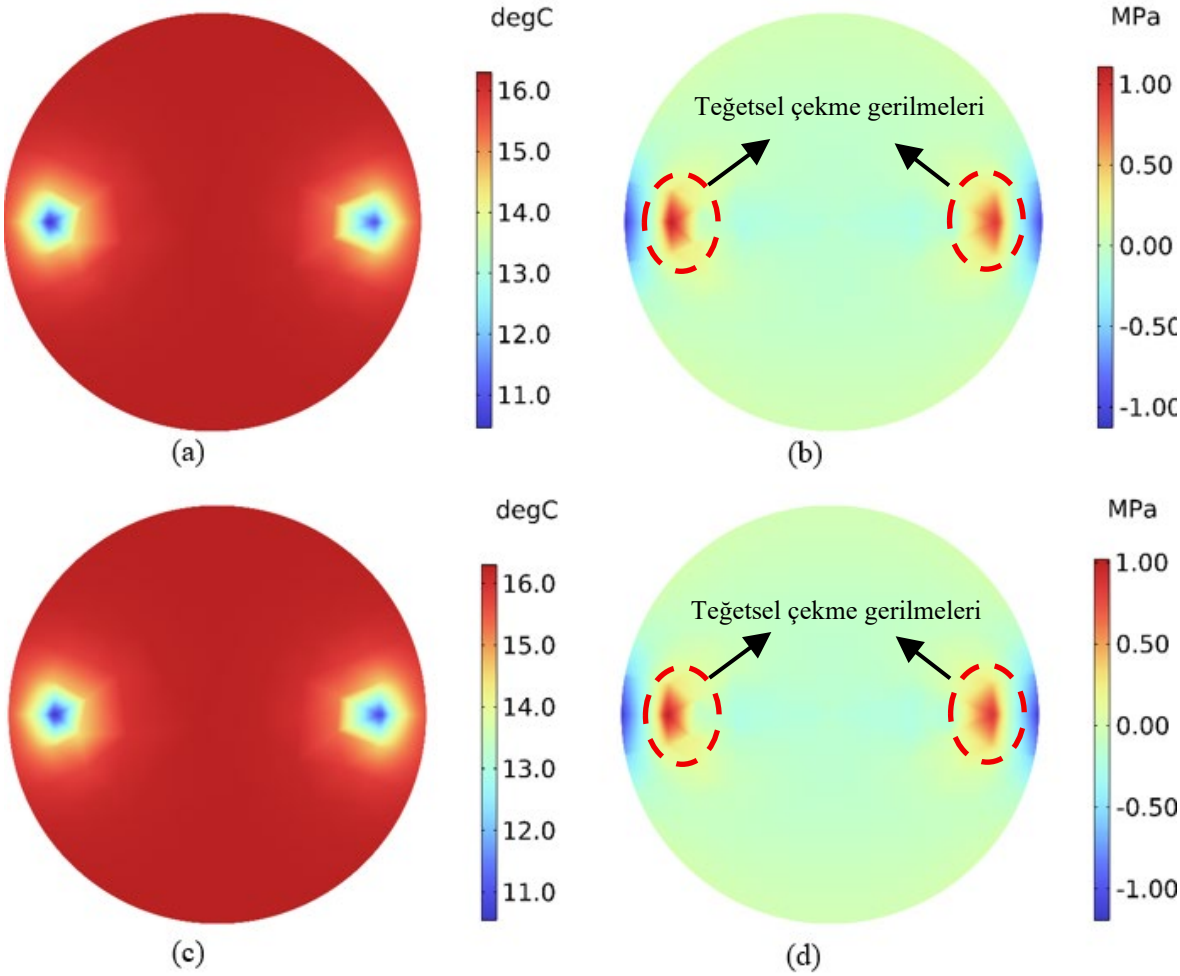
Yaz senaryosunda maksimum çekme teğetsel gerilmesi 2 m derinlikte 3.58 MPa, 10 m derinlikte 3.43 MPa olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 3 ve Şekil 6). Bu gerilmelerin oluştuğu anda boru çevresi ile kazık dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkları sırasıyla 13.2°C ve 12.9°C'dir. Maksimum çekme gerilmeleri kazık çevresindeki beton örtüsünün dış kesimlerinde oluşmuş ve dış beton bölgesi bir çekme membranı gibi davranmıştır.



Şekil 3. Referans durum-yaz mevsimi için sonuçlar: (a) 2 m derinlikte sıcaklık dağılımı, (b) 2 m derinlikte çevresel gerilmeler, (c) 10 m derinlikte sıcaklık dağılımı, (d) 10 m derinlikte çevresel gerilmeler

Kış senaryosunda 2 m ve 10 m derinliklerde maksimum çekme teğetsel gerilmeleri sırasıyla 0.61 MPa ve 0.52 MPa'dır (bkz. Şekil 4). Sıcaklık gradyanları yaklaşık −3.8°C ve −3.7°C seviyesindedir. Soğutma sırasında boru çevresindeki beton büzülmeye çalışmakta, daha

sıcak dış bölgeler bu büzülmeyi sınırlandırmaktadır. Böylece çekme bölgesi dış yüzeyden borulara doğru hareket etmekte ve kazık dışındaki beton örtüsü basınç kabuğu gibi davranmaktadır.

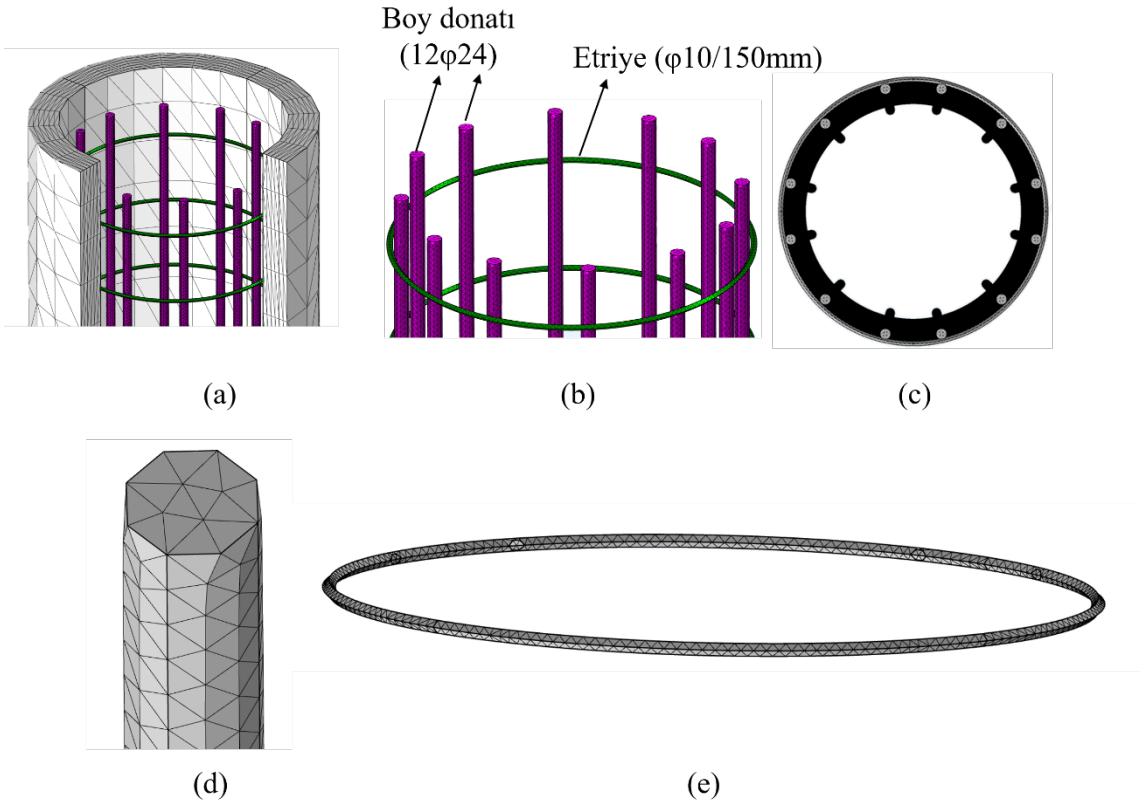


Şekil 4. Referans durum-kış mevsimi için sonuçlar: (a) 2 m derinlikte sıcaklık dağılımı, (b) 2 m derinlikte çevresel gerilmeler, (c) 10 m derinlikte sıcaklık dağılımı, (d) 10 m derinlikte çevresel gerilmeler

Eksenel gerilmeler ile teğetsel gerilmelerin davranışları da birbirinden farklıdır. Yaz koşullarında yalnızca kazığın kendi ağırlığı dikkate alındığı referans modelde eksenel gerilmeler çoğunlukla basınç yönündeyken, yüzeye yakın bazı bölgelerde termal genleşme nedeniyle çekme oluşabilmektedir. Kış koşullarında boru yakınında termal büzülmenin etkisiyle eksenel çekme gerilmeleri gelişebilmektedir. Buna karşılık teğetsel termal gerilmeler mekanik yüklerden büyük ölçüde bağımsız kalmaktadır.

5. MODEL VARYASYONLARI

Farklı modelleme tekniklerinin teğetsel gerilme sonuçlarına etkisini belirlemek için üç ayrı modelleme tekniği kullanılmıştır: (i) donatı ve eksenel mekanik yük içermeyen referans model (bkz. Şekil 2), (ii) donatı kafesi içeren model (bkz. Şekil 5) ve (iii) kazık başında ve zemin yüzeyinde mekanik yük bulunan model. Donatı kafesinde 12φ24 boyuna donatı ve φ10/150 mm kapalı etriye kullanılmıştır. Boyuna donatı oranı %1 olup, modelde tetrahedral ağ elemanları kullanılmıştır.



Şekil 5. Çelik donatı içeren yardımcı sayısal model: (a) 3B görünüş; (b) donatı kafesi; (c) donatı kafesinin üst görünüşü; (d) tek boyuna donatı; (e) tekil etriye görünümü

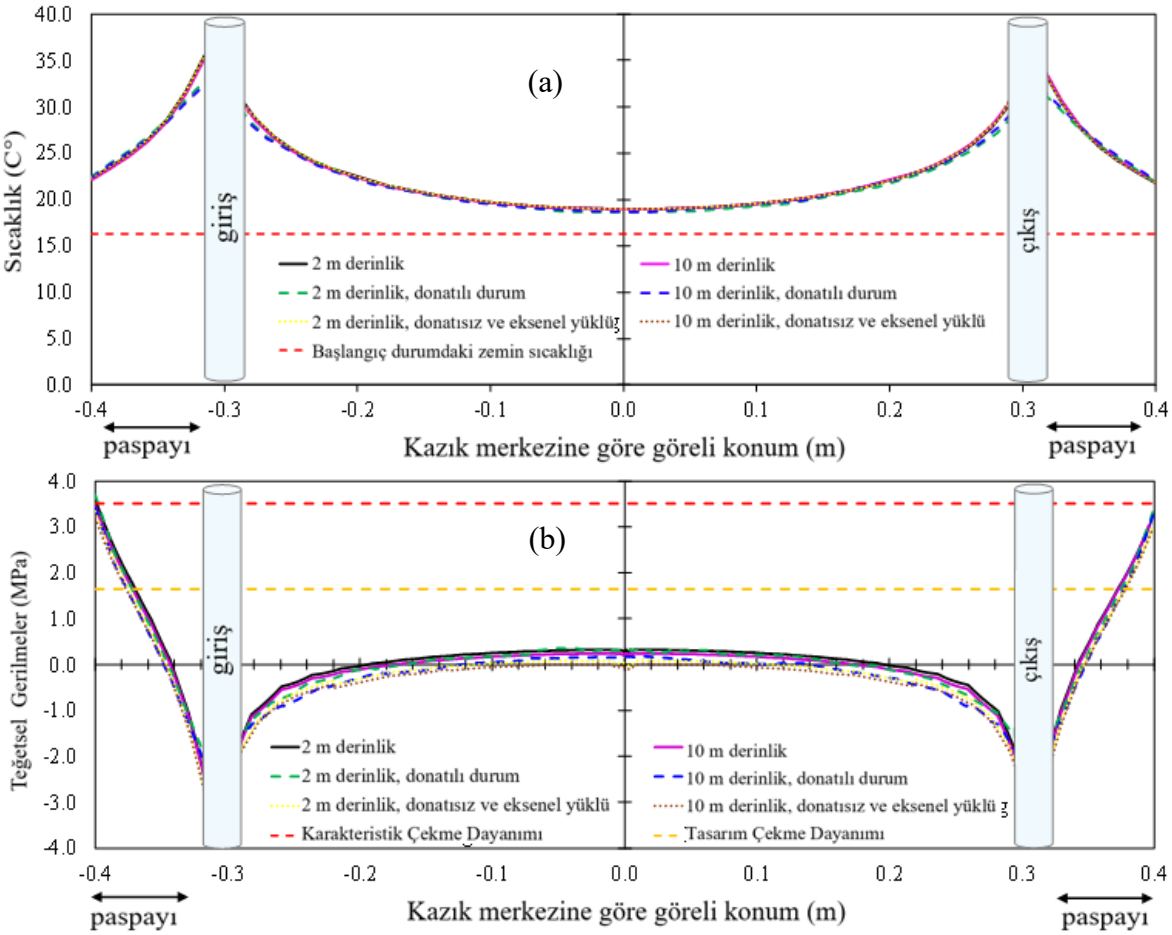
Mekanik yük durumunda kazık başına 1200 kN yük uygulanmıştır. Bu değer yaklaşık 3700 kN olarak hesaplanan nihai taşıma kapasitesinin 3.0 emniyet katsayısı ile bölünmesiyle elde edilen izin verilebilir yükü temsil etmektedir. Ayrıca radye temel yükünü simüle etmek amacıyla zemin yüzeyine 235 kPa düzgün yayılı basınç uygulanmıştır. Bu yük, kazık çevresindeki yatay gerilmeleri ve çevreleme etkisini artıracak şekilde seçilmiştir.

Donatılı modelde çeliğin yüksek ısıl iletkenliği nedeniyle kazık kesitindeki sıcaklık dağılımı bir miktar daha üniform hale gelmiştir. Ancak teğetsel çekme gerilmelerinin büyüklüğü ve konumu donatısız referans model ile neredeyse aynıdır (bkz. Şekil 6). Bunun temel nedeni, sıcaklık dağılımındaki üniformlaşmanın çeliğin daha yüksek ısıl genleşme katsayısından kaynaklanan gerilme artışı ile dengelenmesidir. Dolayısıyla geleneksel donatı, mekanik yüklerin taşınmasında etkili olmakla birlikte, beton örtüsündeki termal teğetsel çekme gerilmelerini azaltan bir tasarım çözümü olarak değerlendirilemez.

Mekanik yüklerin etkisi de benzer şekilde sınırlıdır. Kazık başlık yükü ve zemin yüzeyindeki yayılı yük ile oluşturulan ilave çevreleme basıncına rağmen sıcaklık dağılımı, teğetsel gerilmelerin büyüklüğü ve kritik bölgelerin konumu referans modele çok yakın kalmıştır (bkz. Şekil 6). Bunun nedeni, mekanik yüklerden kaynaklanan gerilmelerin esas olarak kazık ekseni ve kazık-zemin etkileşimi üzerinden gelişmesi, teğetsel termal gerilmelerin ise kesit içerisindeki sıcaklık gradyanları tarafından kontrol edilmesidir.

Bu bulgular, hassasiyet analizlerinin donatı kafesi ve mekanik yüklerin ayrıntılı modellenmesine gerek kalmadan gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Böylece çok daha yoğun ağ elemanı gerektiren çelik donatı modellemesi içeren mekanik analizler yerine,

hesaplama açısından daha etkin bir termo-mekanik model kullanılabilmektedir. Benzer şekilde yüzey yükleri ve kazık başı mekanik yükü teğetsel gerilmelerin büyüklüğü ve konumu üzerinde pratik açıdan önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. Bu nedenle hassasiyet analizlerinde donatı ve mekanik yükler hesaba katılmamıştır (Erginağ vd., 2025).



Şekil 6. Yaz sezonu için elde edilen maksimum teğetsel gerilmelerin oluştuğu anda kazık merkezinden ve borulardan geçen kesit (A-A′) boyunca sıcaklıkların ve çevresel gerilmelerin değişimi: (a) sıcaklık, (b) teğetsel gerilmeler

6. ANALİTİK YAKLAŞIM

Sayısal sonuçların kontrolü amacıyla Timoshenko ve Goodier (1969) tarafından verilen uzun silindirde eksenel dairesel boşluk etrafındaki termal yükleme çözümünden yararlanılmıştır:

$$\sigma_{\theta,teğetsel} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\frac{1}{r^2}\left(\frac{r^2+a^2}{b^2-a^2}\int_a^b Trdr + \int_a^r Trdr - Tr^2\right) \quad (1)$$

Denklem 1'de yer alan α, E, ν, r, a, b ve T sembolleri sırasıyla termal genleşme katsayısını, elastisite modülünü, Poisson oranını, ilgili konum ile borunun merkezi arasındaki mesafeyi, boru merkezi ile boru çevresi arasındaki mesafeyi, boru merkezi ile kazık kenarı arasındaki mesafeyi ve sıcaklık farkını temsil eder.

Referans yaz senaryosunda analitik olarak hesaplanan maksimum teğetsel gerilmeler 2 m ve 10 m derinliklerde sırasıyla 3.48 MPa ve 3.40 MPa olup sonlu eleman sonuçlarıyla uyumludur. Analitik çözüm, ön boyutlandırma ve kontrol amacıyla kullanılabilse de idealize boru geometrisi ve sıcaklık dağılımı nedeniyle karmaşık enerji kazıklarının tasarımında üç boyutlu sayısal yöntemler daha uygundur.

C40/50 beton için Eurocode 2 kapsamında karakteristik tek eksenli çekme dayanımı 3.51 MPa olup, referans yaz senaryosunda elde edilen 3.58 MPa ve 3.43 MPa değerleri bu seviyeye yaklaşmakta, 2 m derinlikte ise aşmaktadır. Tasarım çekme gerilmesi 1.64 MPa olduğundan, özellikle yaz koşullarında termal gerilmeler kritik hale gelmektedir. Kış senaryosundaki yaklaşık 0.64–0.62 MPa değerleri ise bu sınırın altındadır. Bununla birlikte, enerji kazıklarında eksenel, radyal ve teğetsel gerilmelerin birlikte etkimesi betonun etkin çekme kapasitesini azaltabileceğinden, yalnızca tek eksenli çekme dayanımının dikkate alınması yeterli olmayabilir (Kupfer, 1973).

7. HASSASİYET ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

Duyarlılık analizinde malzeme, boru geometrisi ve işletme parametreleri ayrı ayrı değiştirilmiş, diğer tüm parametreler referans değerlerinde tutulmuştur. Malzeme parametreleri beton elastisite modülü, Poisson oranı, ısıl iletkenlik, ısıl genleşme katsayısı ve özgül ısı kapasitesi ile zemin ısıl iletkenliği ve özgül ısı kapasitesidir. Geometrik parametreler kazık çapı ve boru konfigürasyonudur. İşletme parametreleri ise ısı taşıyıcı akışkan hızı ve iklim koşullarıdır. Toplam 40 analiz gerçekleştirilmiştir.

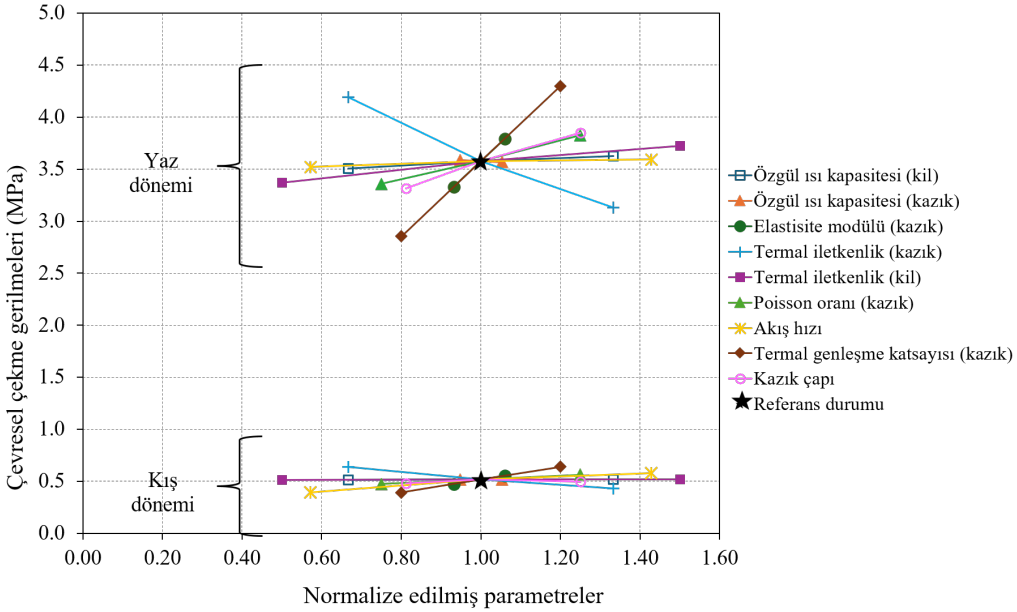
Beton elastisite modülü C30/37, C40/50 ve C50/60 sınıflarına; Poisson oranı 0.15–0.25 aralığına; beton ısıl iletkenliği 1.0–2.0 W/(m°C) aralığına ve ısıl genleşme katsayısı 0.8–1.2 kat referans değer aralığına değiştirilmiştir. Kazık çapları 0.65, 0.80 ve 1.00 m olarak, boru düzenleri U ve W biçiminde ele alınmıştır. Akışkan hızı 0.4–1.0 m/s arasında değiştirilmiş; iklim koşulları İstanbul (16.3°C), Halden (8.0°C) ve Houston (21.6°C) ile temsil edilmiştir.

Hassasiyet analizinin en önemli sonucu, betonun doğrusal ısıl genleşme katsayısının teğetsel çekme gerilmeleri üzerinde en etkili parametre olmasıdır. Isıl genleşme katsayısının artması, aynı sıcaklık gradyanı altında daha büyük serbest termal deformasyon oluşturduğundan kısıtlanmış birim deformasyonları ve dolayısıyla termal gerilmeleri artırmaktadır (bkz. Şekil 7).

Betonun ısıl iletkenliği, teğetsel gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahip olup bu gerilmelerle ters orantılıdır. Isıl iletkenliğin artması, kazık kesitindeki sıcaklık dağılımını daha uniform hale getirerek sıcaklık gradyanlarını ve buna bağlı diferansiyel termal deformasyonları azaltmaktadır. Buna karşılık, betonun elastisite modülü ve Poisson oranındaki artış, kısıtlanmış termal deformasyonların daha yüksek gerilmelere dönüşmesine neden olmaktadır. Zemin ve kazığın özgül ısı kapasitelerinin etkisi ise sınırlı kalırken zemin ısıl iletkenliği özellikle yaz koşullarında sıcaklık dağılımını ve dolayısıyla teğetsel gerilmeleri bir miktar etkilemiştir. Isı taşıyıcı akışkan hızındaki artış her iki işletme koşulunda da gerilmelerde sınırlı bir artışa neden olurken, kazık çapındaki artış özellikle yaz koşullarında daha yüksek teğetsel çekme gerilmeleri oluşturmuştur.

İklim koşulları da önemli bir parametre olup yaz senaryosunda maksimum teğetsel çekme gerilmeleri Halden, İstanbul ve Houston için sırasıyla 4.83, 3.43 ve 2.78 MPa; kış senaryosunda ise 0.63, 0.52 ve 0.81 MPa olarak bulunmuştur. W biçimli boru düzeni,

sıcaklık dağılımını daha uniform hale getirerek U biçimli düzene kıyasla daha düşük gerilmeler oluşturmuş; maksimum gerilmeler yaz ve kış için sırasıyla 3.12 ve 0.60 MPa olmuştur.



Şekil 7. Yaz ve kış senaryoları için teğetsel gerilmelerin duyarlılık analizi sonuçları

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada enerji kazıklarında gömülü ısı değiştirici borularının oluşturduğu üç boyutlu sıcaklık alanının beton örtüsünde (paspayı) meydana getirdiği termal teğetsel gerilmeler incelenmiştir. Doğrulanmış üç boyutlu termo-mekanik sonlu eleman modeli ile ısıtma ve soğutma senaryoları analiz edilmiş ve başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Isıtma ve soğutma sırasında kazık kesitinde uniform olmayan sıcaklık dağılımları oluşmakta; bu dağılımlar kısıtlanmış termal deformasyonlar ve teğetsel gerilmeler meydana getirmektedir.
- Referans durumda yaz işletmesindeki maksimum teğetsel çekme gerilmeleri 2 m ve 10 m derinliklerde sırasıyla 3.58 MPa ve 3.43 MPa; kış işletmesinde ise 0.61 MPa ve 0.52 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler betonun tasarım çekme mukavemeti açısından kritik öneme sahiptir. Yaz işletmesinde çekme gerilmeleri kazık dış çevresindeki beton örtüsünde yoğunlaşırken, kış işletmesinde çekme bölgesi boru çevresine doğru kaymaktadır. Dolayısıyla işletme çevrimi boyunca beton örtüsünün farklı bölgeleri çekmeye maruz kalmaktadır.
- Donatı kafesi sıcaklık dağılımını bir miktar uniformlaştırmasına rağmen termal teğetsel gerilmelerin büyüklüğünü ve konumunu anlamlı ölçüde azaltmamaktadır. Bu nedenle geleneksel donatı termal yüklerin azaltılması açısından tek başına etkin değildir. Kazık başı mekanik yükü ve zemin yüzeyindeki yayılı yük, termal teğetsel gerilmelerin büyüklüğü ve konumu üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkiye sahiptir.
- Betonun ısıl genleşme katsayısı termal teğetsel gerilmeleri kontrol eden en etkili parametredir. Kazığın ısıl iletkenliğinin artırılması ise sıcaklık gradyanlarını ve buna bağlı gerilmeleri azaltmaktadır. İklim koşulları, boru konfigürasyonu ve işletme

sıcaklıkları termal gerilme düzeyini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. W biçimli boru düzeni referans U biçimli düzene göre daha düşük gerilme üretmiştir.

- Tasarım açısından, termal teğetsel gerilmeler betonun çekme kapasitesiyle birlikte değerlendirilmeli; gerektiğinde beton dayanımı ve lif donatısı artırılmalı, yüksek ısıl iletkenlikli beton ve daha uniform sıcaklık dağılımı sağlayan boru konfigürasyonları tercih edilmelidir. Ayrıca, ısı taşıyıcı akışkanın giriş sıcaklığı kontrol edilmeli ve tekrarlı termal çevrimlerin uzun dönemli etkileri dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Abdelaziz, S., Ozudogru, T.Y. (2016), "Non-uniform Thermal Strains and Stresses in Energy Piles", Environmental Geotechnics, Vol 3(4), 237-252.

Adinolfi, M., Maiorano, R.M.S., Mauro, A., Massarotti, N., Aversa, S. (2018), "On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 16, 32-44.

American Concrete Institute Committee 318 (2019), "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19)", American Concrete Institute.

American Petroleum Institute (2000), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design, API RP 2A-WSD", American Petroleum Institute.

Batini, N., Rotta Loria, A.F., Conti, P., Testi, D., Grassi, W., Laloui, L. (2015), "Energy and Geotechnical Behaviour of Energy Piles for Different Design Solutions", Applied Thermal Engineering, Vol 86, 199-213.

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, Vol 59(3), 237-248.

Carotenuto, A., Marotta, P., Massarotti, N., Mauro, A., Normino, G. (2017), "Energy piles for Ground Source Heat Pump Applications: Comparison of Heat Transfer Performance for Different Design and Operating Parameters", Applied Thermal Engineering, Vol 124, 1492-1504.

Cecinato, F., Salciarini, D. (2022), "Energy Performance Assessment of Thermo-Active Micro-Piles via Numerical Modeling and Statistical Analysis", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 29, 100268.

Çinicioğlu, Ö., Polat, S., Erginağ, U.C., Sutman, M., Güner, M. (2025), "Thermally Induced Tensile Hoop Stresses in Energy Piles: Implications for Design and Operation", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 43.

Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J., Haghighat, F. (2017), "A Review on Energy Piles Design, Sizing and Modelling", Energy, Vol 122, 390-407.

Faizal, M., Bouazza, A., Haberfield, C., McCartney, J.S. (2018), "Axial and Radial Thermal Responses of a Field-Scale Energy Pile under Monotonic and Cyclic Temperature Changes", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 144(10).

Faizal, M., Bouazza, A., Singh, R.M. (2016), "An Experimental Investigation of the Influence of Intermittent and Continuous Operating Modes on the Thermal Behaviour of a Full Scale Geothermal Energy Pile", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 8, 8-29.

Faizal, M., Moradshahi, A., Bouazza, A., McCartney, J.S. (2022), "Soil Thermal Response to Temperature Cycles and End Boundary Conditions of Energy Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Fang, J., Kong, G., Meng, Y., Wang, L., Yang, Q. (2020), "Thermomechanical Behavior of Energy Piles and Interactions within Energy Pile–Raft Foundations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 146(9).

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.

Kong, L., Qiao, L., Xiao, Y., Li, Q. (2019), "A Study on Heat Transfer Characteristics and Pile Group Influence of Enhanced Heat Transfer Energy Piles", Journal of Building Engineering, Vol 24.

Kupfer, B. (1973), "Nonlinear Behavior of Concrete under Biaxial Stress".

Laloui, L., Rotta Loria, A.F. (2020), "Analysis and Design of Energy Geostructures", Academic Press.

Li, Q., Yin, Y., Kong, L., Qiao, L. (2021), "Enhancing Heat Transfer in the Heat Exchange Medium of Energy Piles", Journal of Building Engineering, Vol 40.

Loveridge, F., McCartney, J.S., Narsilio, G.A., Sanchez, M. (2020), "Energy Geostructures: A Review of Analysis Approaches, in situ Testing and Model Scale Experiments", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 22, 100173.

Lv, Z., Kong, G., Liu, H., Ng, C.W.W. (2020), "Effects of Soil Type on Axial and Radial Thermal Responses of Field-Scale Energy Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 146(10).

Moradshahi, A., Faizal, M., Bouazza, A., McCartney, J.S. (2021), "Cross-Sectional Thermo-Mechanical Responses of Energy Piles", Computers and Geotechnics, Vol 138, 104320.

Mousa, M.M., Bayomy, A.M., Saghir, M.Z. (2020), "Experimental and Numerical Study on Energy Piles with Phase Change Materials", Energies, Vol 13(18).

Park, S., Sung, C., Jung, K., Sohn, B., Chauchois, A., Choi, H. (2015), "Constructability and Heat Exchange Efficiency of Large Diameter cast-in-place Energy Piles with Various Configurations of Heat Exchange Pipe", Applied Thermal Engineering, Vol 90, 1061-1071.

Polat, S., Guner, M., Erginag, U.C., Sutman, M., Cinicioglu, O. (2025), "Analyses of Thermoactive Piles Considering Surface Radiation and Wind Convection Effects", International Journal of Geomechanics, Vol 25(1).

Ravera, E., Rotta Loria, A.F., Laloui, L. (2024), "Performance of Complex Energy Geostructures", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 38, 100536.

Rotta Loria, A.F., Laloui, L. (2016), "The Interaction Factor Method for Energy Pile Groups", Computers and Geotechnics, Vol 80, 121-137.

Rotta Loria, A.F., Laloui, L. (2017), "Thermally Induced Group Effects among Energy Piles", Géotechnique, Vol 67(5), 374-393.

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, Vol 18, 56-68.

Sutman, M., Speranza, G., Ferrari, A., Larrey-Lassalle, P., Laloui, L. (2020), "Long-Term Performance and Life Cycle Assessment of energy piles in Three Different Climatic Conditions", Renewable Energy, Vol 146, 1177-1191.

Timoshenko, S., Goodier, J.N. (1969), "Theory of Elasticity", McGraw Hill.