

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK  
İNCELENMESİ VE KAZIK ARALIKLARININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Talha ÖZKAYA**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2016**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK  
İNCELENMESİ VE KAZIK ARALIKLARININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Talha ÖZKAYA  
(501081322)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN**

**HAZİRAN 2016**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501081322 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Talha ÖZKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK İNCELENMESİ VE KAZIK ARALIKLARININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Recep İYİSAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK**      .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi**      : 2 Mayıs 2016  
**Savunma Tarihi**    : 3 Haziran 2016



*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam kapsamında yer altı ısısından faydalanmanın bir yolu olan enerji kazıklarının inceledim. Enerji kazıklarının ideal ısı tasarımı hakkında fikir sahibi olabilmek adına çalışma boyunca çeşitli parametrelerin ve farklı tasarım konfigürasyonlarının ısı transferine etkisini bilgisayar ortamında analiz etme ve sonuçlarını detaylı inceleme fırsatı buldum. Elde ettiğim sonuçları, yorumları ile birlikte sunduğum bu çalışmamın konuyla ilgilenecek kişi ve kurumların başvurabileceği faydalı bir kaynak olmasını umuyorum.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca engin bilgisini ve tecrübesini paylaştığı ve her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Tuğrul ÖZKAN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında zamanını ve tecrübesini paylaşan Sayın Dr. Murat AYDIN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca destek ve yardımları için Sayın Makine Mühendisi Hasan KAŞIKÇI ve Sayın Makine Mühendisi Şükrü DİNÇER'e teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans eğitimimde de yanımda olan ve bana karşı olan inançlarını hiçbir zaman yitirmeyen sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Haziran 2016

Talha ÖZKAYA  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                               | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | ix        |
| KISALTMALAR .....                                                        | xi        |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                     | xiii      |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                       | xv        |
| SEMBOLLER .....                                                          | xvii      |
| ÖZET.....                                                                | xix       |
| SUMMARY .....                                                            | xxi       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                    | 3         |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                                          | 3         |
| 1.3 Tez Kapsamı ve Elde Edilen Temel Sonuçlar.....                       | 7         |
| <b>2. ENERJİ KAZIKLARI VE DİĞER TOPRAK ALTI ISI</b>                      |           |
| <b>    DEĞİŞTİRİCİLER İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....</b>                | <b>9</b>  |
| 2.1 Kazıklı Temeller.....                                                | 9         |
| 2.1.1 Enerji kazıkları.....                                              | 9         |
| 2.1.2 Enerji kazığı davranışları .....                                   | 11        |
| 2.2 Jeotermal Enerji ve Yer Altı Isısı .....                             | 13        |
| 2.3 Sığ Derinliklerdeki Isı Enerjisi.....                                | 17        |
| 2.4 Zemin Kaynaklı Isıtma ve Soğutma Sistemleri.....                     | 18        |
| 2.4.1 Açık döngü sistemler .....                                         | 19        |
| 2.4.2 Kapalı döngü sistemler.....                                        | 20        |
| 2.5 Isı Pompaları .....                                                  | 22        |
| 2.6 Isı Transferi .....                                                  | 24        |
| 2.6.1 Zemin içerisinde ısı transferi.....                                | 25        |
| 2.6.2 Zemin içerisinde ısı transferine etki eden parametreler .....      | 25        |
| 2.7 Isıl Tepki Testi .....                                               | 26        |
| <b>3. ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK</b>               |           |
| <b>    İNCELENMESİ .....</b>                                             | <b>29</b> |
| 3.1 Model Tanımlamaları .....                                            | 29        |
| 3.2 Parametre İncelemeleri.....                                          | 31        |
| 3.3 Farklı Parametrelerin Isı Transferine Etkisi .....                   | 33        |
| 3.3.1 Borular arası mesafenin etkisi.....                                | 34        |
| 3.3.2 Kazık çapının etkisi.....                                          | 34        |
| 3.3.3 Boru çapının etkisi .....                                          | 36        |
| 3.3.4 Isı değiştirici boru sayısı etkisi.....                            | 37        |
| 3.3.5 Çoklu U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi.....  | 38        |
| 3.4 Farklı Enerji Kazık Konfigürasyonlarının Isı Transferine Etkisi..... | 40        |
| 3.4.1 Kazık kullanım süresinin ısı transferine etkisi.....               | 41        |
| 3.4.2 Kazık sayısının ısı transferine etkisi .....                       | 42        |
| 3.4.3 Kazık aralıklarının ısı transferine etkisi .....                   | 43        |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b> | <b>47</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>               | <b>51</b> |
| <b>EKLER.....</b>                   | <b>55</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>               | <b>75</b> |

## **KISALTMALAR**

|                       |                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>CO<sub>2</sub></b> | : Karbondioksit                                     |
| <b>COP</b>            | : Performans Katsayısı (Coefficient of Performance) |
| <b>ITT</b>            | : Isıl Tepki Testi                                  |
| <b>PE</b>             | : Polietilen                                        |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | : Kükürt dioksit                                    |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1: Son kullanıcıya yönelik birim ısıtma maliyetleri. ....                                           | 16 |
| Çizelge 3.1: Comsol analizlerinde kullanılan sabit parametreler. ....                                         | 31 |
| Çizelge 3.2: Parametre analizlerinde ele alınan değişkenler. ....                                             | 33 |
| Çizelge 3.3: Parametre analizlerinde ele alınan değişkenler ve elde edilen birim ısı transfer değerleri. .... | 40 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1: Sonsuz silindir kaynak modeli (Cui ve diğ, 2011). ....                                                                                                                                           | 4  |
| Şekil 2.1: Enerji kazığı şeması (Lee, 2009). ....                                                                                                                                                           | 10 |
| Şekil 2.2: 2013 yılı dünya birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı<br>(Url-1). ....                                                                                                            | 13 |
| Şekil 2.3: Değişik enerji kaynaklarının kWh başına gram olarak CO <sub>2</sub> emisyonları<br>(Url-3). ....                                                                                                 | 14 |
| Şekil 2.4: a) Fosil yakıtlarının doğrudan yakılması ile ısı enerjisi üretilmesi, b) Fosil<br>yakıtlardan üretilen elektrik enerjisi kullanan ısı pompası ile ısı enerjisi<br>üretilmesi (Aydın, 2015). .... | 15 |
| Şekil 2.5: Yer küredeki sıcaklık dağılımı (Url-5). ....                                                                                                                                                     | 18 |
| Şekil 2.6: <i>İstanbul/Maslak</i> bölgesinde toprak sıcaklığının farklı aylarda derinlik ile<br>değişimi (Aydın, 2015). ....                                                                                | 19 |
| Şekil 2.7: Açık döngü sistem uygulaması (Minister of Natural Resource Canada,<br>2004). ....                                                                                                                | 20 |
| Şekil 2.8: Kapalı döngü yatay sistem uygulama örnekleri (Minister of Natural Resource<br>Canada, 2004). ....                                                                                                | 21 |
| Şekil 2.9: Kapalı döngü sistem uygulamaları (Uponor, 2012). ....                                                                                                                                            | 22 |
| Şekil 2.10: Isı pompası çalışma şeması (Uponor, 2012). ....                                                                                                                                                 | 23 |
| Şekil 2.11: Zemin kaynaklı ısı pompası ile ısı transfer şeması (Brandl, 2006). ....                                                                                                                         | 24 |
| Şekil 2.12: Zemin-kazık arasındaki ısı hareketinin şematik gösterimi (Ölçeksiz)<br>(Olgun ve diğ., 2010). ....                                                                                              | 25 |
| Şekil 2.13: Isıl tepki testi elemanları (Gültekin, 2014). ....                                                                                                                                              | 28 |
| Şekil 2.14: Isıl tepki testi şeması (Gültekin, 2014). ....                                                                                                                                                  | 28 |
| Şekil 3.1: Comsol modeli ve ağ yapısı. ....                                                                                                                                                                 | 30 |
| Şekil 3.2: 4. vaka analizinde kullanılan kazık kesiti. ....                                                                                                                                                 | 32 |
| Şekil 3.3: 11. vaka analizinde kullanılan kazık kesiti. ....                                                                                                                                                | 33 |
| Şekil 3.4: PE boru monte edilmiş enerji kazığı donatısı. ....                                                                                                                                               | 34 |
| Şekil 3.5: Boru merkez eksenini ile kazık merkez eksenini arasındaki uzaklıklarına göre<br>modelleme sonuçları. ....                                                                                        | 35 |
| Şekil 3.6: Kazık çaplarına göre modelleme sonuçları. ....                                                                                                                                                   | 35 |
| Şekil 3.7: Kazık çaplarına göre modelleme sonuçları (1 aylık analiz). ....                                                                                                                                  | 36 |
| Şekil 3.8: Boru çaplarına göre modelleme sonuçları. ....                                                                                                                                                    | 37 |
| Şekil 3.9: Kazık içerisindeki U-tüp sayısına göre modelleme sonuçları. ....                                                                                                                                 | 38 |
| Şekil 3.10: 5U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi. ....                                                                                                                                   | 39 |
| Şekil 3.11: 3U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi. ....                                                                                                                                   | 39 |
| Şekil 3.12: 1800 saatlik kesintisiz çalışma için birim ısı transfer değerleri. ....                                                                                                                         | 41 |
| Şekil 3.13: Analizlerde kullanılan enerji kazığı dizilimleri. ....                                                                                                                                          | 42 |
| Şekil 3.14: Farklı sayıda enerji kazıkları kullanımı durumunda birim ısı transfer<br>değerleri. ....                                                                                                        | 43 |
| Şekil 3.15: 3 m aralıklı kazıklar için 1 hafta devamlı işletim sonundaki sıcaklık<br>dağılımı. ....                                                                                                         | 44 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.16:</b> 3 m aralıklı kazıklar için 1 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                         | 45 |
| <b>Şekil 3.17:</b> 3 m aralıklı kazıklar için 2.5 ay (1800 saat) kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı. ....                             | 45 |
| <b>Şekil A.1:</b> 1 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 56 |
| <b>Şekil A.2:</b> 2 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 57 |
| <b>Şekil A.3:</b> 3 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 58 |
| <b>Şekil A.4:</b> 4 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 59 |
| <b>Şekil A.5:</b> 5 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 60 |
| <b>Şekil A.6:</b> 6 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 61 |
| <b>Şekil A.7:</b> 7 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 62 |
| <b>Şekil A.8:</b> 8 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 63 |
| <b>Şekil A.9:</b> 9 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                            | 64 |
| <b>Şekil A.10:</b> 10 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 65 |
| <b>Şekil A.11:</b> 11 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 66 |
| <b>Şekil A.12:</b> 12 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 67 |
| <b>Şekil A.13:</b> 13 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 68 |
| <b>Şekil A.14:</b> 14 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 69 |
| <b>Şekil A.15:</b> 15 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 70 |
| <b>Şekil A.16:</b> 16 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 71 |
| <b>Şekil A.17:</b> 17 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.....                                          | 72 |
| <b>Şekil B.1:</b> 6 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 35 günlük kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı (ilk ısı etkileşim). .... | 73 |
| <b>Şekil B.2:</b> 6 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 2,5 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı. ....                     | 73 |
| <b>Şekil B.3:</b> 9 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 2,5 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı. ....                     | 74 |

## SEMBOLLER

|       |                                 |         |
|-------|---------------------------------|---------|
| $c_p$ | Özgöl Isı Kapasitesi            | J/(kgK) |
| $H$   | Kuyu derinliği                  | m       |
| $k$   | Eğim                            | -       |
| $Q$   | Çekilen / Gönderilen ısı        | W       |
| $r$   | Yarı çap                        | m       |
| $t_b$ | Minimum ısıl tepki testi süresi | s       |

## GreK Harfleri

|                 |                         |                   |
|-----------------|-------------------------|-------------------|
| $\alpha$        | Isıl yayılım katsayısı  | m <sup>2</sup> /s |
| $\lambda$       | Isıl İletkenlik         | W/mK              |
| $\lambda_{eff}$ | Efektif Isıl İletkenlik | W/mK              |
| $\rho$          | Yoğunluk                | kg/m <sup>3</sup> |



# **ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK İNCELENMESİ VE KAZIK ARALIKLARININ ISIL PERFORMANSA ETKİSİ**

## **ÖZET**

Dünya genelindeki enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmı kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtlar aracılığıyla elde edilmektedir. Fosil yakıtlara olan büyük bağımlılık neticesinde yakın gelecekte tükenme ihtimalleri doğmuştur. Bununla birlikte fosil yakıtların yanması ile atmosfere salınan karbondioksit ve kükürt dioksit çevreye ve ozon tabakasına kalıcı zararlar vermekte ve iklim değişikliklerine sebep olmaktadır. Tüm bu olumsuz etkenler araştırmacıları ekonomik, temiz ve sürdürülebilir enerji arayışına yöneltmektedir.

Temiz ve sürdürülebilir enerji söz konusu olduğunda ilk akla gelenlerden biri jeotermal enerjidir. Derin jeotermal enerjilerine ulaşmak ve çıkarmak mevcut teknolojiler ile çok zor ve maliyetli iken, sığ jeotermal enerjiden yararlanmak çok daha kolay olmaktadır. Sığ derinliklerdeki ısı enerjisinden nispeten yeni bir teknoloji olan toprak kaynaklı ısı pompaları ile yararlanılmaktadır. Zeminin, mevsimsel hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyen sabit sıcaklığından yararlanan toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ile geoteknik mühendisliğinin en yaygın kesişme noktası ise enerji kazıklarıdır.

Yapısal nedenlerle ihtiyaç duyulan kazıklı temel sistemlerine ilave edilen ısı değiştirici borular ile meydana gelen enerji kazıkları, taşıdıkları yapıya destek olurken bir yandan da zemin ile ısı alışverişinde bulunarak yapının ısıtılıp / soğutulmasını sağlarlar. Enerji kazıklarının ve temas halinde oldukları zeminin ısıl performansının doğru belirlenmesi, yetersiz veya aşırı tasarımların önüne geçilmesi hususunda önemlidir.

Bu çalışma kapsamında çeşitli parametreler ile enerji kazık süresi, sayısı ve kazık aralığı gibi varyasyonların enerji kazıklarının ısıl performansına etkisi sayısal modelleme yöntemi ile araştırılmıştır. İncelenen parametreler arasında kazık çapı ile ısı değiştirici boru çapı, sayısı ve boru aralıkları bulunmaktadır. Comsol Multifizik paket programı ile yapılan modellemelerde zemin ve betonunun ısıl ve geometrik özellikleri girilerek iki boyutlu model oluşturulmuştur. Zemin doğal sıcaklığı, giden ve dönen sıvı sıcaklıkları, zemin ile kazık betonunun yoğunluğu, spesifik ısı kapasitesi ve ısıl iletim katsayıları sabit tutulmak şartıyla bahsi geçen diğer parametreler sırasıyla değiştirilerek kazığın ortalama birim ısı transfer değerine yaptığı etkiler belirlenmiştir.

Tek bir kazık üzerinde gerçekleştirilen parametre analizleri, gerçek durumu yansıtan birden fazla kazığın kullanılması durumlarının analizi ile genişletilmiştir. Bu noktada bir kazığın uzun süreli çalışması, birden fazla kazığın bir arada çalışması ve kazık aralıkları değişimi durumları da analiz edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar genel kanıyı destekleyerek, kazık çapı ve ısı değiştirici boru çapının artması ile birim ısı transfer oranı değerlerinin arttığını göstermiştir. Kazık içerisindeki dolaşım borusu sayısı da birim ısı transfer değerini arttırmaktadır. Son

parametre olan ısı değiştirici boruların kazık merkezi ile arasındaki mesafesi incelendiğinde de, boruların kazık çapına yaklaşması ile ısı transferine olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Parametre analizlerinin ardından farklı çalışma koşullarının ve kazık dizilimlerinin ısı transferine etkisi incelenmiştir. 1800 saat (2,5 ay) süreyle kesintisiz çalışan bir kazığın ortalama birim ısı transfer değeri, 50 saatlik test sonuçlarıyla kıyaslandığında, 1 hafta çalışması durumunda % 6, 1 ay ve 2,5 ay süreyle kesintisiz çalışması durumunda ise sırasıyla % 23 ve % 33 düşmüştür.

Enerji kazıklarının birlikte çalışma durumu incelendiğinde ise artan her kazık sayısının bir tek kazığın ortalama birim ısı transfer değerini düşürdüğü görülmüştür. Bu durum daha fazla kazık ile ısı çekilmesi / atılması durumunda zemin ile ısı taşıyıcı sıvının sıcaklık farkının azalması sonucu meydana gelmektedir. 3 adet ve 9 adet kazığın bir arada olduğu durumlarda kritik kazık olan merkezdeki kazıklarda tek kazığa göre sırasıyla % 14 ve % 36'lık performans kayıpları meydana geldiği görülmüştür.

Son olarak kazık yerleşim aralıklarının kazık termal performansına etkisi incelenmiştir. Buna göre 3 m aralıklarla yerleştirilen kazıklar 1 hafta sonunda termal etkileşime girerek termal performansları düşerken, 6 m aralıklarla yerleştirildiğinde bu süre 35 güne çıkmaktadır. 9 m aralıklarla yerleştirilen kazıklarda ise 1800 saatlik analiz sonucunda termal etkileşim meydana gelmemiş ve tekil kazık durumundaki performanslarını korumuşlardır.

# **PARAMETRIC INVESTIGATION ON THERMAL PERFORMANCE OF ENERGY PILES AND EFFECT OF PILE INTERVALS ON THEIR THERMAL PERFORMANCES**

## **SUMMARY**

The most of energy needs of worldwide are obtained through fossil fuels such as petrol, coal and natural gas. As a result of large dependence on fossil fuels, extinction probabilities of these sources have been occurred. In addition to this, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) which emitted with burning of fossil fuels are damaged to atmosphere and ozone layer. This process is caused to global warming and climate change. All these negative factors are directing researchers to explore affordable, clean and sustainable energy.

One of the most important clean and sustainable energy resources is geothermal energy. Reach and use of deep geothermal energy is difficult and costly operation with existing technologies while it is much easier to make use of shallow geothermal energy. It is utilized shallow geothermal energy by ground source heat pump which is relatively new technology.

Heat pumps transfer heat from a medium at lower temperature to another medium at higher temperature. In this way, according to purpose, first medium is cooled or second medium is heated or kept warmed. There are three different types of heat pumps: air source heat pumps, water source heat pumps and ground source heat pumps. Ground source heat pumps use ground as heat source or heat sinks. It takes advantage of constant temperature of ground which is not affected daily and seasonal temperature variations. The most common point of intersection of geotechnical engineering and ground source heat pump systems is energy piles.

Energy piles are form from with add heat exchanger pipe on piles which are already required for structural reasons. By this way energy piles provide cooling/heating buildings by exchange heat with ground while they support building. The heat carrier fluid which is circulated in heat exchanger pipes, extract heat from ground and injection to gas which is circulated in heat pump. Temperature of gas is increased by the another circulation in heat pump. And then heat of gas is transferred to liquid which will circulate in mechanical installation of building, so it is provided to heat building. When the building is wanted to be cooled, heat extract from building and inject to ground by processing the reverse conversion.

Accurate determination of the thermal properties of energy piles and surrounded ground is important for prevent insufficient or overdesign. Thermal response test is applied to determine the thermal properties of the ground. In thermal response tests, which is also known geothermal response test in literature, temperature changes in the ground is monitored by applying heat to the ground at the same time. Not only coefficient of thermal conductivity of ground is obtained by thermal response test, but also thermal resistance of energy piles and undisturbed ground temperature can be obtained.

Thermal properties of piles vary depending on thermal properties of materials which was used to generate energy piles and on the geometry of piles.

Within scope of this thesis, the effect of various parameters and some variable such as an operation term of energy piles, number of piles and interval between the piles was investigated by numerical modelling method. Diameters of energy piles and heat exchanger pipes, numbers and intervals of pipes are the parameters which were examined. 2D models were created by defining the thermal and geometric characteristics of concrete and ground to COMSOL Multiphysics package software. Effects of the mentioned parameters on average unit heat transfer rate were determined by changing value of them respectively while provided that other parameters kept constant.

Firstly, layout of heat exchanger pipes has been examined. The distance between the center of heat exchanger pipes and center of pile was taken as references in this analysis. Accordingly, unit heat transfer rate is increased as long as the heat exchanger pipes closer to the pile wall. As a result of reduplicate distance between centers of pile and pipe, average heat transfer rate is increased by about % 30.

Pile diameter is the parameter which was examined secondly. To examine the effect of pile diameter, piles in diameters 60 cm, 80 cm, 100 cm and 120 cm were modeled and the results of their analyses were compared. According to results obtained, unit heat transfer rate increase while diameter of pile increasing. For instance, when the diameter of pile which is in 60 cm was increased by % 33, average unit heat transfer rate increased by about % 8. Likewise, when the diameter of pile was increased by % 66 and % 100, average unit heat transfer rate increased by about % 14 and % 18 respectively.

Next parameter studied was the number of heat exchanger pipe loop in the pile. Single Piles which consist U-tube, double U-tube, triple U-tube, quartet U-tube and quintet U-tube cycle were analyzed and compared. Increment amount of average unit heat transfer rate was about % 40 while transition to double U-tube from single U-tube, about % 10 while transition to triple U-tube from double U-tube, and about only % 5 while transition to quartet U-tube from triple U-tube.

Heat exchanger tube placement has been studied for piles which contain more than single U-tube cycle. Accordingly, for piles which contain single U-tube, average unit heat transfer rate had increased by around % 29 when the distance between centers of pile and pipes was reduplicated. When the same test applied to piles which were contain triple U-tube and quintet U-tube cycle, increment of average unit heat transfer rate realized by % 52 and % 69 respectively.

After parametric analysis, impacts of the different operations conditions and different lineup of piles on the heat transfer performance were examined. Firstly, effects of the long term operations on thermal performance were analyzed by case of 1800 hours (2.5 months) non-stop operation of pile modeled. 50 hours of test result which used in parametric analyses was taken as reference. Accordingly, average unit heat transfer value is decreases by % 6 as a result of one-week non-stop operation condition, and it decreases by % 23 and % 33 as a result of one month and 2.5 months nonstop operations respectively.

When the more than one pile operating situation examined, it was found that average unit heat transfer value of one pile was decreased. This is occurred with temperature difference between heat exchanger fluid and ground decrease faster as a result of heat

injection/rejection to/from ground with more than one pile. When 3 piles or 9 piles are used together, thermal performance of critical pile, which is placed at the center of other piles, decreased by % 14 and % 36 respectively.

Finally effects of piles intervals on thermal performance of energy piles were analyzed. Accordingly, when the energy piles placed with 3m intervals, piles interact with the other ones at the end of the one week, so thermal performance of energy piles were decreased. When the piles placed with 6 m intervals, thermal interaction occurred at the end of the 35<sup>th</sup> day. There was no interaction observed between piles at the end of 1800-hour operation.



## 1. GİRİŞ

Yapı temelleri üst yapı yüklerini güvenli bir şekilde zemine aktaran yapı elemanlarıdır. Taşıma gücü ve oturma koşullarını sağlayabilen zeminlerde yüzeysel temeller inşa edilirken, aksi durumlarda derin temeller kullanılır. Derin temellerin en yaygın kullanılan türü ise kazıklı temellerdir. Kazıklar taşıma gücü zayıf olan zeminlerde, inşa edilecek olan üst yapı yüklerini daha derinlerde bulunan sağlam tabakalara aktaran, sağlam tabakaların ulaşılabilir derinliklerde olması durumunda ise sürtünme yoluyla zemine aktaran yapısal elemanlardır. Kullanım amaçlarına göre, yapımında kullanılan malzemeye göre ve zemin içerisine yerleştirilme tarzına göre sınıflandırılabilen kazıklar son yıllarda üst yapıyı desteklerken, aynı zamanda zeminden ısı elde edebilecek şekilde de imal edilebilmektedir.

Enerji kazıkları adı verilen bu sistemler statik açıdan ihtiyaç duyulan kazıklara döngü boruları eklenerek elde edilir. Isı değiştirici borular, önceden imal edilmiş içi boş kazıklarda, kazığın betonarme iç duvarına temas edecek şekilde kazığın boş kısmına yerleştirilmektedir. Yerinde dökülen kazıklarda ise borular kazık donatısının iç kısmına monte edilmektedir (Peron ve diğ, 2011). Bu haliyle kazıklar, yapısal görevlerinin yanı sıra toprak altı ısı değiştirici olarak da görev yaparlar. Bünyelerine eklenen döngü borularında çevrilen su veya antifriz-su karışımı aracılığıyla zeminden ısı transfer edilerek yapının ısıtılması ve/veya soğutulması sağlanır. Zeminin günlük ve mevsimsel hava sıcaklığı değişimlerinden etkilenmeyen sabit sıcaklığından faydalanan enerji kazıkları çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynağı alternatifleri arayışının arttığı şu günlerde dikkat çekici bir tasarım olarak öne çıkmaktadır.

Dünyadaki nüfus artışı, sanayileşme ve gelişen teknolojiler ile enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Dünya geneline baktığımızda ise bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar aracılığı ile giderilmektedir. Ancak yeni kaynakların geliştirilememesi, mevcut kaynakların bilinçsiz bir şekilde kullanılması gibi sebepler sonucunda fosil yakıtların tükenme tehlikesi ortaya çıkmıştır. Fosil yakıtlara ait olumsuzluklar bu kadarla da kalmamaktadır. Sırasıyla küresel ısınma ve iklim değişikliklerinin ana nedeni olan sera etkisi, fosil temelli enerji

kaynaklarının kullanımı sonucu salınan karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) gazı nedeniyle meydana gelmektedir. Fosil yakıt kaynaklı enerji üretiminin yüksek maliyeti de göz önüne alındığında, dünyanın bu yakıtlara olan bağımlılığını aşağıya çekmek amacıyla bilim adamlarının alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışı çabaları yoğunlaşmış ve hükümetler de bu konuda kararlar alıp, bu tür çabaları desteklemeye başlamışlardır (Olgun ve diğ., 2010). Örnek vermek gerekirse, 30 Kasım – 11 Aralık 2015 tarihleri arasında Paris’te düzenlenen iklim zirvesinde, Türkiye’nin de dâhil olduğu 190’dan fazla ülkenin yaptığı anlaşmaya göre küresel sıcaklık artışı yüzyılın sonuna kadar 2 derecenin altında tutulması kararlaştırılmıştır. Bu da karbon emisyonunun % 40 ila 70 oranında azaltılması anlamına gelmektedir ki mevcut enerji kaynakları ile bu mümkün gözükmemektedir. Tüm bu gelişmeler neticesinde günümüzde klasik enerji kaynaklarına ek olarak, yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak isimlendirilen güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, deniz-dalga enerjileri ve biokütle gibi enerji kaynakları üzerine araştırmalar yapılmakta ve uygulamalar gerçekleştirilmektedir (Keskin, 2012).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de jeotermal enerjidir. Jeotermal enerji toprak yüzeyi altında depolanmış ısı enerjisi şeklinde tanımlanmaktadır. Zeminin belli bir derinlikten itibaren günlük ve mevsimlik değişimlerden etkilenmeyen sabit sıcaklığı, güneş veya rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran daha kararlı ve sürekli bir enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır. Son 30 yıllık süreçte gelişen teknolojilerle birlikte sadece akiferlerin olduğu belli başlı bölgelerde değil, hemen her bölgede sığ jeotermal enerji diye adlandırılan zeminin ilk 200-300 metrelik kısmından enerji elde etmek mümkün olmaktadır. Yapıların ısıtılması, soğutulması ve sıcak su kullanımı gibi amaçlarla kullanılan yer altındaki bu ısı enerjisine, zemine çeşitli dolaşım sistemleri kurularak ulaşılmaktadır.

Toprak altı ısı değiştiricisi şeklinde adlandırılan bu döngü sistemlerinde sıvı dolaşımı bir ısı pompası yardımıyla gerçekleştirilir. Bu sistemler ile sadece su döngüsü için harcanacak az miktarda bir enerji ile klasik fosil yakıt temelli sistemlere göre büyük enerji tasarrufları yapmak mümkündür. Ayrıca su dolaşımı için kullanılacak elektrik enerjisi haricinde bir enerji ihtiyacı olmayacağı için, CO<sub>2</sub> salınımı da geleneksel yöntemlere göre epey düşmektedir.

## 1.1 Tezin Amacı

Zemin kaynaklı ısıtma ve soğutma sistemlerinden biri olan enerji kazıkları, hem ekonomik, hem de yenilenebilir enerji kullanan çevre dostu bir sistem olarak son yıllarda dikkatleri çekmektedir. Enerji kazıklarının ısıl performansı ve ısı transferi neticesinde oluşacak sıcaklık değişimlerinin, kazığın statik davranışına etkisi bilim adamlarının ilgilendiği konular arasındadır. Bu bağlamda tezin asıl amacı, enerji kazıkları için ısıl performans açısından ideal tasarım geometrisini elde etmek olarak belirlenmiştir. Bunun için COMSOL Multiphysics programında farklı geometride enerji kazığı kesitleri tasarlanarak ısı transfer analizleri gerçekleştirilmiştir. Diğer parametreler sabit kalmak şartıyla her sefer bir parametre değiştirilerek ısı transferine etkisi incelenmiştir. Etkisi incelenen parametreler arasında kazık çapı, kazık içerisindeki dolaşım borusu sayısı, dolaşım borusu çapları, dolaşım borularının kazık içerisindeki farklı aralıklarla yerleşimi bulunmaktadır. Ayrıca kazık işletim süresi, kullanılan kazık sayısı ve kazık aralıklarının da kazık ısıl performansına etkisi analiz edilmiştir.

## 1.2 Literatür Araştırması

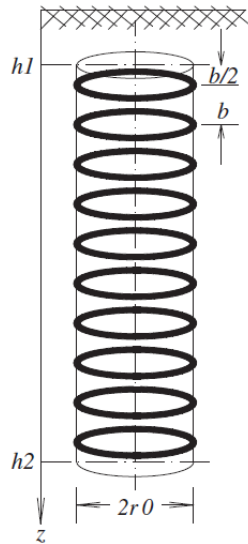
Son yıllarda literatür çalışmaları, enerji kazıklarının ısıl performansı ile ilgili modelleme çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca ısıl performansın belirlenmesinde ilk adım olan ve zeminin ısıl özelliklerini belirlemede kullanılan ısıl tepki testi (ITT) ile ilgili araştırmalar da literatürde mevcut olup, bu çalışmalardan tez konusu ile yakın ilgili olanlar aşağıda kronolojik sırada verilmiştir.

Abu Hamdeh ve diğ. (2001), harici olarak yönetilebilen birim hacim ağırlık ve su muhtevasının zeminin ısıl iletkenlikleri üzerine etkisini farklı zemin tipleri için laboratuvar ortamında incelemiştir. Hem zemin yoğunluğu hem de su muhtevası değerlerinin artmasıyla zemin ısıl iletkenliğinin arttığı görülmüştür. Ayrıca mineralojik bileşenlerinden dolayı kumlu zeminlerin ısıl iletkenlik değerleri killi zeminlere göre daha yüksek bulunmuştur.

Abdelaziz ve diğ. (2011) üç boyutlu modelleme ile enerji kazıklarının ısı transfer performansına etki eden parametreler incelenmiştir. Buna göre ısıl açıdan geliştirilmiş beton ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip zeminler ile daha yüksek oranda ısı transferi elde edilebileceğini, dolaşım borusu çapları ve dolaşım sıvısı karışım oranlarının ise ısı

transferine önemli bir etki yapmadıkları belirtilmiştir. Ayrıca akış çalkantılı olduğu sürece akış debisinin de önemli olmadığını fakat çalkantılı akışın laminar akışa nazaran çok daha iyi ısı transferi sağladığı da görülmüştür. Kazık materyali ve kazık çapı da önemli bir etki yapmazken en önemli faktörün zeminin ısı iletkenliği olduğu belirtilmiştir.

Cui ve diğ. (2011), enerji kazıkları için geliştirdikleri “katı silindirik modeli” helisel borulu enerji kazıkları için daha uygun hale getirebilmek için geliştirmişler ve halka-sarmal kaynak model olarak adlandırmışlardır. Bu modelde silindir içi ve dışı aynı madde ile doludur, yani tüm domain homojen bir elemandır. Isı kaynağı da silindir yüzeyin merkezine  $z$  aksı boyunca oluşturulur. Isı kaynağının kalınlığı, yoğunluğu ve ısı kapasitesi ihmal edilir. Bu modelde sarmal şeklindeki helisel borular silindir yüzeyinde ayrılmış halkalar halinde basitleştirilmiştir (Şekil 1.1). Eksenel ısı transferinin toplam ısı transfer verimliliğine etkisini analiz edebilmek için hem sonlu hem de sonsuz halka sarmal kaynak model araştırılmıştır. İki model kısa süreli işletim için benzer sonuçlar verirken uzun süreli işletim de büyük farklar göstermişlerdir. Sonsuz modelde işletim süresi sonsuza giderken zemin ve kazığın ısıl tepkisi sonsuza doğru gitmiş, sonlu model ise sabit bir duruma ulaşmıştır ki bunun gerçek davranışa daha yakın olduğu belirtilmiştir. Ayrıca enerji kazıkları, enerji kuyularına göre daha düşük derinlik/çap oranına sahip olduğu için sonlu modelin kullanılması tavsiye edilmiştir.



**Şekil 1.1:** Sonsuz silindir kaynak modeli (Cui ve diğ, 2011).

Özüdoğru ve diğ. (2012) mevcut ısı iletkenlik testlerinin geçerliliğini ve geleneksel süreçlerin enerji kazıklarına uygulanabilirliğini test etmek için üç boyutlu sayısal model geliştirmişlerdir. Model arazide gerçekleştirilen ısı iletkenlik test sonuçları ile karşılaştırılarak kalibre edilmiş ve farklı geometrideki kazıkların modellenenebilmesi ve yorumlanması için uygun hale getirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda, geliştirilen sayısal modelin ısı iletkenlik testleri boyunca ısı değişimini iyi bir şekilde yansıtır, doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır.

Park ve diğ. (2013), içi boş prekast kazıklara üçlü U-tüp ve W tipi borular yerleştirerek ısı performans karşılaştırması yapmıştır. Arazide hazırlanan kazıklarda gerçekleştirilen ısı tepki testi (ITT)'nin ardından kazıklar üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile modellenerek zemin ısı iletkenliği ve kazık ısı dirençleri belirlenmiştir. Daha sonra sayısal modelde iki farklı boru tipine sahip olan enerji kazıkları için 72 saatlik ITT gerçekleştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Devamlı işletimde iki kazık birbirine yakın verimlilik sunarken, 8 saat aralıklı işletimde üç U-tüp borulu enerji kazığı, W tip borulu kazığa göre %15 daha fazla ısı değişim oranı sağlamıştır. Aralıklı işletimin devamlı işleme göre daha karlı olması, enerji kazıklarının ısı değiştirici kuyulara göre daha iyi ısıtma ama daha kötü soğutma performansı sağlaması da yazarların bu çalışma sonucu vardıkları diğer sonuçlardır.

Angelo Zarella ve diğ. (2013a), nispeten kısa boylu, çift U-tüp borulu ve helisel borulu ısı değiştirici kuyuların ısı davranışlarını incelemiş ve karşılaştırmıştır. Yazarların önceden oluşturdukları ve “direnç kapasitesi modeli” adını verdikleri modeli kuyu ve zemin içerisindeki eksenel ısı iletimlerini de hesaba katması için geliştirmişlerdir. Carm-He adını verdikleri yeni model zemini yüzey, kuyu ve derin olarak üç bölüme ayırmaktadır. Yüzey ve derin bölgelerde ısının sadece derinlik yönünde iletiildiği, kuyu bölgesinde ise iki boyutlu ısı transferi gerçekleştiği kabulü ile işlem yapılmaktadır.

Yazarlar farklı koşul kombinasyonları için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu koşullar; kuyuların 18m ve 24 m boyunda olması, uzun ve kısa dönem işletim durumları, uzun dönem için ısıtma, soğutma ağırlıklı ve denge kullanım durumları şeklinde değişmektedir. Her durumda helisel borunun ısı performansı çift U-tüp boruya göre daha iyi çıkmıştır. Vaka analizlerinde helisel borulu kuyunun boyu, çift U-tüp borulu kuyudan % 33 daha kısa olduğu zaman, uzun vadede aynı ısı performansı gösterdikleri kanıtlanmıştır.

Angelo Zarella ve diğ. (2013b), geliştirdikleri model ile üç U-tüp borulu ve helisel borulu enerji kazıklarının da ısı açıdan karşılaştırmıştır. Arazide test kazıkları imal edilmiş ve yapılan ölçümlerde elde edilen gidiş ve dönüş sıvı sıcaklıkları ile modelde elde edilen değerler karşılaştırılarak, sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Ardından modelde yapılan diğer analizlerde helisel borulu kazığın üçlü U-tüp borulu kazığa nazaran daha iyi ısı transfer oranı sağladığı ama çok daha fazla basınç kaybı yaşadığı görülmüştür. Daha sonra aynı şartlarda enerji kuyusu ile enerji kazığı modellenip karşılaştırılmış ve enerji kazığının hem pik ısı yükü hem de birim enerji çıkarma oranı olarak daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Son olarak helisel borulu kazıklarda boru sarım aralıkları incelenmiş ve aralık azaldıkça performansın arttığı sonucuna varılmıştır.

Hu ve diğ. (2014), enerji kazıklarında ITT sonuçlarını analiz etmek için çizgi kaynak metodu ve silindirik kaynak metodunu referans alan yeni bir modelleme yaklaşımı sunmuştur. “Kompozit silindirik model” adını verdikleri model zemin kaynaklı ısıtma sistemlerinde kuyu veya kazık betonunun da ısı kapasitesini hesaba katmaktadır. Modelin geçerliliği Çin’de inşa edilen bir hastanenin enerji kazıklarında gerçekleştirilen ITT deneyi ile onaylanmıştır. Ayrıca model sonuçları; çizgi kaynak metodu, kompozit çizgi kaynak metodu, içi boş silindirik kaynak metodu ve katı silindirik kaynak metodu ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların ilk 30 saatten sonra benzer çıktığı, erken saatlerde ise çizgi kaynak, katı ve içi boş silindirik kaynak metodlarının sıvı dönüş sıcaklıklarını olduğundan fazla görülmüştür.

Loveridge ve Powrie (2014), kazık ısıl direncini etkileyen faktörleri incelemiş ve anahtar faktörlerin betonun ısıl iletkenliği, ısı değiştirici boru sayısı ve bu boruları saran beton miktarı olduğunu göstermiştir. Genellikle daha fazla sayıdaki ısı değiştirici borunun daha az beton ile örtüldüğü durumlarda ısıl direnç daha az olmuştur. Ayrıca yapılan modelleme çalışmalarında geniş çaplı kazıkların ısıl açıdan sabit duruma gelmesi için birkaç günün geçmesi gerektiği, bu süredeki betonun ısı depolamasını da göz önünde bulunduran tasarım metodlarının daha doğru sonuçlar vereceği belirtilmiştir.

Wang ve diğ. (2015), yer altı suyu akışının helisel borulu enerji kazıklarına etkisini incelemek için sonlu elemanlar metodunu kullanan üç boyutlu simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Hem sayısal hem de analitik analizler yer altı suyu akışının ısı transfer performansını arttırdığı belirtilmiştir. Yazarlar daha sonra simülasyon

sonuçlarını referans alarak, boyutsuz efektif hız parametresini içeren analitik bir model geliştirmişlerdir. Modelin helisel borulu enerji kazıklarının performansını, simülasyondan daha iyi tanımladığı görülmüş fakat ısı değiştirici kazık ile belirlenen bir nokta arasındaki radyal mesafe arttıkça model doğruluğunun düştüğü belirtilmiştir.

Bezyan ve diğ. (2015), üç boyutlu sayısal simülasyon ile tek U, tek W ve helisel borulu enerji kazıkları üzerinde ısı performans değerlendirmesi yapmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. En verimli sistemi bulabilmek için helisel borulu kazıkların farklı aralıkları ile kazıkların paralel ve seri bağlı olma durumları da incelenmiştir. En verimli kombinasyonun birbirine seri bağlı helisel borulu enerji kazıkları olduğu görülmüştür. 0,2, 0,4 ve 0,6m sarmal aralıklarına sahip helisel borulu kazıklardan en etkili ısı transferini 0,4m aralıklı kazıklar gerçekleştirmiştir.

Franco ve diğ. (2015), enerji kazıklarında yapılan ITT deneylerinin çizgi kaynak metodu ile yorumlanmasının geçerliliğini ve ITT sonuçlarına etki eden faktörleri COMSOL yazılımı aracılığıyla sayısal olarak incelemiştir. Enerji kazıklarının limitli olan boyu ve yapılan bazı kabullere bağlı olarak çizgi kaynak metodu kullanımının hatalara sebebiyet verebileceği ve bu durumda bir takım düzeltme faktörleri kullanılması gerekliliği belirtilmiştir. Çizgi kaynak metodu ile zeminin ITT sonuçları yorumlandığında, zeminin ısı özellikleri oranının, boru aralıklarının ve kazık çapına bağlı olarak sonuçların hatalı yorumlanabileceğini, kazık betonu ile zeminin hacimsel ısı kapasitesinin, boru çaplarının ve farklı boru geometrilerinin ITT sonuçlarına çok fazla etki etmediği de görülmüştür.

### **1.3 Tez Kapsamı ve Elde Edilen Temel Sonuçlar**

Bu tez çalışmasında, Bölüm 2’de enerji kazıkları ile ilgili temel kavramlar (jeotermal enerji ve yer altı ısı, zemin kaymaklı ısıtma ve soğutma sistemleri, ısı pompaları, ısı transferi ve ısıl tepki testi) hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te analizlerde kullanılan bilgisayar yazılımı ve modelleme çalışmasında kullanılan geometri, ağ yapısı ve varsayımların açıklanmasının ardından yapılan parametrik incelemelere geçilmiştir. İncelemesi yapılan tüm parametrelerin (ısı değiştirici borular arası mesafe, enerji kazığı çapı, ısı değiştirici boru çapı, boru sayısı ve çoklu U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafe) açıklaması ve analizlerde bu parametreler için seçilen sayısal değerler ayrıntılı olarak verildikten sonra analiz sonuçları sunulmuştur. Aynı bölümde

son olarak farklı enerji kazık konfigürasyonlarının (enerji kazığı işletim süresi, kazık sayısı ve kazık aralıkları) ısı transferine etkisi incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Sonuç bölümünde ise tüm analiz sonuçları özetlenmiş, optimum ısı transfer oranını elde etmek kullanılması gereken enerji kazığı kesiti hakkında önerilerde bulunulmuştur.

## **2. ENERJİ KAZIKLARI VE DİĞER TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLER İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR**

### **2.1 Kazıklı Temeller**

Kazıklı temeller, zeminin üst yapıdan gelen yükleri taşıma konusunda yetersiz olduğu veya zeminin oturma şartlarını sağlamaması durumunda en çok başvurulacak çözümlerden biridir. Burada kullanılan esas yapı elemanları kazıklardır.

Kazıklar farklı özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekilde sınıflandırılabilirler. Kazığın imalatında kullanılan malzemeye göre ahşap, beton, çelik veya kompozit olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Üst yapıdan gelen yükleri zemine aktarma şekline göre ise uç kazığı veya sürtünme kazığı şeklinde sınıflandırılırlar. Uç kazıkları üst yapıdan gelen yükleri, daha derinlerdeki sağlam tabakaya aktarırken, sürtünme kazıkları sağlam tabakaların ulaşılabilir derinliklerde olduğu durumlarda, kazık çevresinde oluşan sürtünme kuvveti ile zemine aktarılırlar.

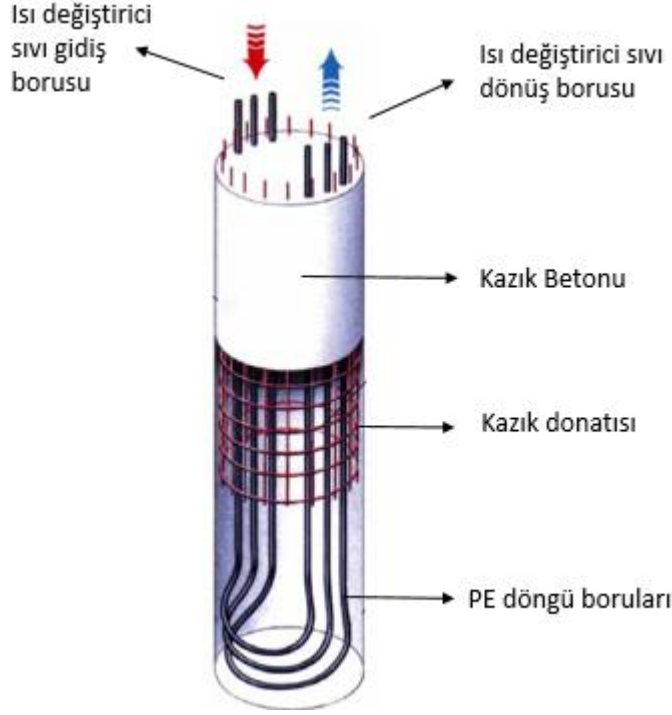
Diğer bir kazık sınıflandırma şekli ise kazığın zemine yerleştirme şekline göre yapılan sınıflandırmadır. Önceden hazırlanmış kazığın zemine, serbest düşüm yapan mekanik bir tokmak ile çakıldığı kazıklara çakma kazık denir. Kazığın imal edileceği bölgede açılan çukur içerisine donatı yerleştirilip, betonlanması ile oluşturulan kazıklar ise yerinde dökme kazıklar olarak adlandırılırlar.

#### **2.1.1 Enerji kazıkları**

Enerji kazıkları, zaten yapısal açıdan ihtiyaç olan temel kazıklarından aynı zamanda yapıların ısıtılıp soğutulmasında da faydalanan sistemlerdir. Bu ikincil amacı gerçekleştirmek için kazıklar, zeminin belli bir derinlikten itibaren sıcaklığının yıl boyunca sabit kalması özelliğinden, dolayısıyla jeotermal enerjiden yararlanırlar. Jeotermal enerji ve zeminin sabit sıcaklığı ile ilgili ayrıntılı bilgileri ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Enerji kazıkları yapıların ısıtılması veya soğutulmasını, temas halinde olduğu zemin ile ısı transferi gerçekleştirerek sağlarlar. Bunun için kazık donatısına yerleştirilen

polietilen borular (PE) içerisinde sıvı döngüsü gerçekleştirilir. Şekil 2.1’de bir enerji kazığının şematik yapısı gösterilmektedir. PE borular, kolektörler vasıtasıyla yapı içerisinde konumlandırılan ısı pompasına bağlanır. Ardından ısı taşıyıcı sıvıdan elde edilen ısı, ısı pompası aracılığıyla yapıya gönderilir. İlerleyen bölümlerde ısı pompası ile ilgili de ayrıntılı bilgi verilecektir.



**Şekil 2.1:** Enerji kazığı şeması (Lee, 2009).

Enerji kazıkları, kazık imalatı için harcanacak delgi masrafının mecburi olduğu düşünülürse, çok düşük ilave borulama maliyetleri ile kuyu ısı değiştirici sistemlere nazaran çok daha düşük ilk yatırım maliyetlerine sahiptirler.

Enerji kazıkları ilk olarak 1980’lerin başında İsviçre ve Avusturya’da kullanılmaya başlanmış ve daha sonra Avrupa genelinde yaygınlaşmıştır. Büyük ölçekli projelere verilebilecek örnekler arasında 56 katı Frankfurt Ana Kulesi ve Zürih Ulusları Havalimanı E-terminali ilave inşaatı verilebilir. İsviçre, Almanya, Avusturya, Japonya, İngiltere ve Çin’de çok sayıda mühendislik uygulaması yapılarak sistemin kullanılabilirliği ispatlanmıştır (Olgun ve diğ, 2006). Türkiye’de bilinen ilk örneği ise Sabiha Gökçen havalimanında bulunan uçak hangarı için yapılan uygulamadır (Coşman, 2013).

### 2.1.2 Enerji kazığı davranışları

Enerji kazıkları ile jeotermal enerjiden yararlanırken, kazıklar ve etrafındaki zemin sıcaklık değişimine bağlı ilave ısı yüklerine maruz kalırlar. Enerji kazıklarının esas amacının yapıyı desteklemek ve yapıdan gelen yükleri güvenle zemine aktarmak olduğu düşünülürse, ısı yüklerine bağlı oluşacak gerilme ve deplasmanlar incelenmeli ve kazığın emniyetinden emin olunmalıdır. Bu tezin kapsamında olmamasına rağmen, konunun ehemmiyeti açısından bu konuda da literatür araştırılması yapılmış ve kısa özeti bu bölümde sunulmuştur.

Bourne-Webb ve diğ. (2009) İngiltere – Londra’da Lambeth Koleji için üretilen 143 adet enerji kazıklarında arazi deneyleri gerçekleştirmiştir. Titreşen kablolu yük hücresi, deformasyon ölçer ve ısı direnç gibi ekipmanların kullanıldığı deneyde, test kazıklarında yük, deformasyon ve sıcaklık değişimleri devamlı takip edilerek kayıt edilmiş, ısı değişikliklerinin kazığın geoteknik tepkilerine etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Kazıklara uygulanan sıcaklık değişimleri sonucunda kazıkta meydana gelen deplasmanlar uniform bir şekilde gerçekleşmemiştir. Bu da kazığın serbest bir kolon gibi davranmadığını, kazığı çevreleyen zeminin kazık tepkisini değiştirdiğini ve kazık gövdesindeki ve ucundaki sınırlamalar nedeniyle kolon üzerinde uniform olmayan bir deplasman dağılımı sağladığı görülmüştür. Ayrıca kazık tepkilerinin “termo-elastik” olduğu sonucuna varılmış; yani ısı döngü boyunca kazık tepkisi değişiminin sadece kazığın büzülmesi veya genleşmesi sonucu meydana geleceği ve etkinin de geri dönüşebilir bir etki olduğunu açıklamışlardır.

Peron ve diğ. (2011), enerji kazıkları tasarımı için yük transfer metodunu referans alan sayısal tasarım metodu sunmuş, ayrıca kazık tasarımının, ısı değişim işlemi boyunca kazık yüzey sürtünmesinin mobilizasyonunu ve beton direncini göz önünde bulundurarak nasıl uyarlanacağı ve optimize edileceğini göstermişlerdir. Modellerinin geçerliliğini kanıtladıktan sonra temsili vakalar üzerinde analizler yapılmış ve ısı transferinin farklı kazıklar üzerinde etkilerini özetlemişlerdir. Buna göre; yapı ağırlığını hem uç direnci hem de gövdesindeki sürtünme ile destekleyen yarı sürtünme kazıklarının ısıtılması durumunda kazığın deplasmanı önemli derecede engellenmiş ve kazıkta ekstra sıkışma oluşmuştur. Yüksek taşıma direncine bağlı olarak nihai taşıma kapasitesi sorun yaratmamıştır. Soğutma işleminde ise kazık başlığı-yapı etkileşimi ve rijit zemin-kazık gövdesi etkileşimi, kazığın üst 5m’lik kısmındaki deformasyonu

tamamıyla engellemiştir. Kazığın en alt kısmında ise kayma gerilmesi yön değiştirmiştir. Bu da zemin parametrelerine bağlı olarak negatif kayma gerilmesinin oluşabileceğini göstermiştir. Bu durum kazığın taşıma kapasitesi açısından avantajlı olmasına rağmen kazıkta çekme gerilmeleri oluşmasına sebebiyet verebilir. Bu nedenle kazıkların çalışma şartlarına bağlı olarak çekmeye karşı da dirençli şekilde tasarlanması gerekebilir.

Gashti ve diğ. (2014), enerji kazıklarının termo-mekanik davranışını üç boyutlu model kullanarak sayısal olarak analiz etmiştir. Modellerinin öncekilerine göre farkını ısı değiştirici boruların kazık içerisindeki geometrisini de hesaba katması olarak açıklamışlardır. Yapılan analizler sonucunda ısı yüklemeye bağlı en büyük gerilme değerlerinin kazığın alt ve üst bölgelerinde, iki U-tüp borusunun birbirlerine bakan iç kısımlarında meydana geldiğini görmüşlerdir. Kazığın orta kısımlarındaki ekstra gerilmeler ise derinlik ile birlikte azalmıştır. Oluşan maksimum basınç gerilmeleri ortalama kazık dayanımının %20'sine tekabül etmiştir. Kazık soğutulduğunda ise bazı noktalarda çekme gerilmeleri ile karşılaşmış fakat kayda değer büyüklükte olmadığı belirtilmiştir. Sonuçlar ısı değişimine bağlı deplasmanların genel yapılarda önemli bir etkiye sahip olmayacağını ve göz ardı edilebileceğini, fakat oturma hassas yapılarda hesaba katılması gerekliliğini göz önüne sermiştir. Ayrıca kazık yüzeylerinin donma sınırı altındaki sıcaklıklara (2 °C) maruz bırakılmaması şiddetle tavsiye edilmiştir.

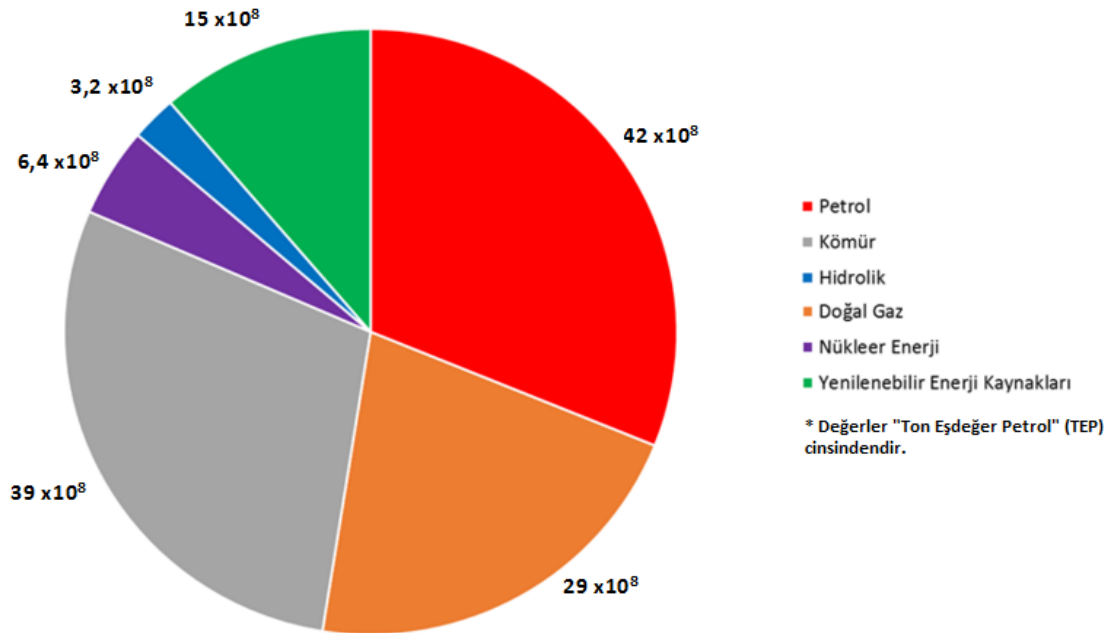
Di Donna ve diğ. (2015), arazi deney sonuçları da bulunan bir grup enerji kazığının davranışını üç boyutlu sayısal termo-hidro-mekanik model ile analiz etmişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak aşırı sıcaklık değişimleri ve temeldeki kazıkların tamamı değil de uniform olmayan bir şekilde seçilenlerin ısıtılması gibi farklı durumlar da analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada, diğer çalışmalardaki gibi buradaki vakada da, ısı yüklerin deplasman ve gerilmeler açısından kritik bir durum meydana getirmediği görülmüş, temelin geoteknik açıdan güvenilirliğinden emin olunmuştur.

Çalışmada dikkat çeken noktalardan biri temeldeki tüm kazıklardan sadece birinin veya üçünün ısıtılması esnasında gerçekleşmiştir. Kazıkların birbirine bağlı olmasından dolayı ısıtılan kazıkların kısıtlanması sonucu, bu kazıklarda ısı etkiye bağlı maksimum gerilmeler oluşmuştur. Isıtma periyodunun sonunda bu kazıklardaki yüksek ısı zeminde yayılarak diğer kazıklara ulaşmış, böylece ısıtılan kazıklardaki kısıtlama azalarak gerilmelerin azalmasına ve diğer kazıklardaki gerilmelerin de

artmasıyla ekstra kuvvetler kazıklar arasında dağılmaya başlamıştır. Diğer bir dikkat çeken nokta ise, yine belirli kazıkların ısıtılması durumunda, ısıtılmayan kazıklarda da birbirlerine bağlı olmalarından dolayı yukarı doğru çekme oluşmuş ve bu kazıklardaki basınç gerilmesi azalmıştır. Bunun neticesinde temel kazıklarında farklı farklı gerilmeler ve deplasmanlar meydana gelmiştir.

## 2.2 Jeotermal Enerji ve Yer Altı Isısı

Günümüzde dünya enerji üretiminde fosil kaynaklı yakıtlara büyük bir bağlılık bulunmaktadır. Genel enerji tüketiminin yaklaşık % 80 gibi büyük kısmını karşılayan fosil kaynaklı yakıtlar petrol, doğal gaz ve kömür gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Şekil 2.2’de Enerji Bakanlığı’na yayınlanmış 2013 yılına ait dünyada birincil enerji tüketiminin kaynaklarına göre dağılımı görülmektedir. Bu hızla tüketilmeye devam etmeleri durumunda yakın gelecekte tükenme riski bulunan bu enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynakları sunmak özellikle gelişmiş ülkelerin başlıca gündem başlıkları olmaktadır. Yenilenebilir enerji söz konusu olduğunda ilk akla gelen kaynaklardan biri ise jeotermal enerjidir.



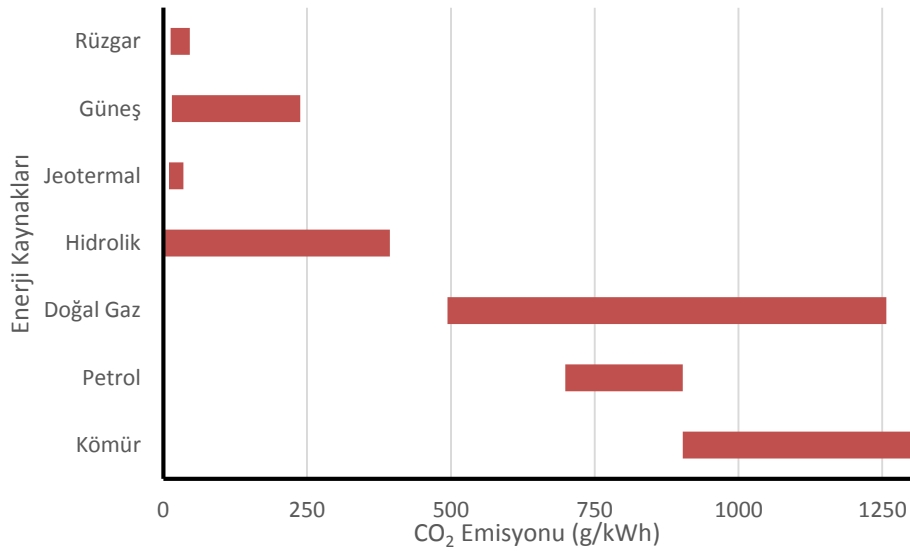
**Şekil 2.2:** 2013 yılı dünya birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı (Url-1).

Jeotermal enerji yerin derinliklerinde kayalar içinde birikmiş olan ısınnın akışkanlarca taşınarak rezervuarlarda depolanması ile oluşmuş sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisidir (Url-2). Bir başka

deyişle jeotermal enerji, yer kabuğunun ulaşılabilir derinliklerinde olağandışı olarak birikmiş ısı potansiyelinin ekonomik olarak yararlanılabilinen şeklidir (Olcay, 2012).

Jeotermal akışkanı meydana getiren sular, genellikle meteorik kökenli olduklarından yer altındaki rezervuarlar sürekli beslenmekte ve kaynak yenilenebilmektedir. Bu nedenle pratikte beslenmenin üzerinde kullanma olmadıkça jeotermal kaynakların azalması söz konusu değildir (Tamyerli, 2007).

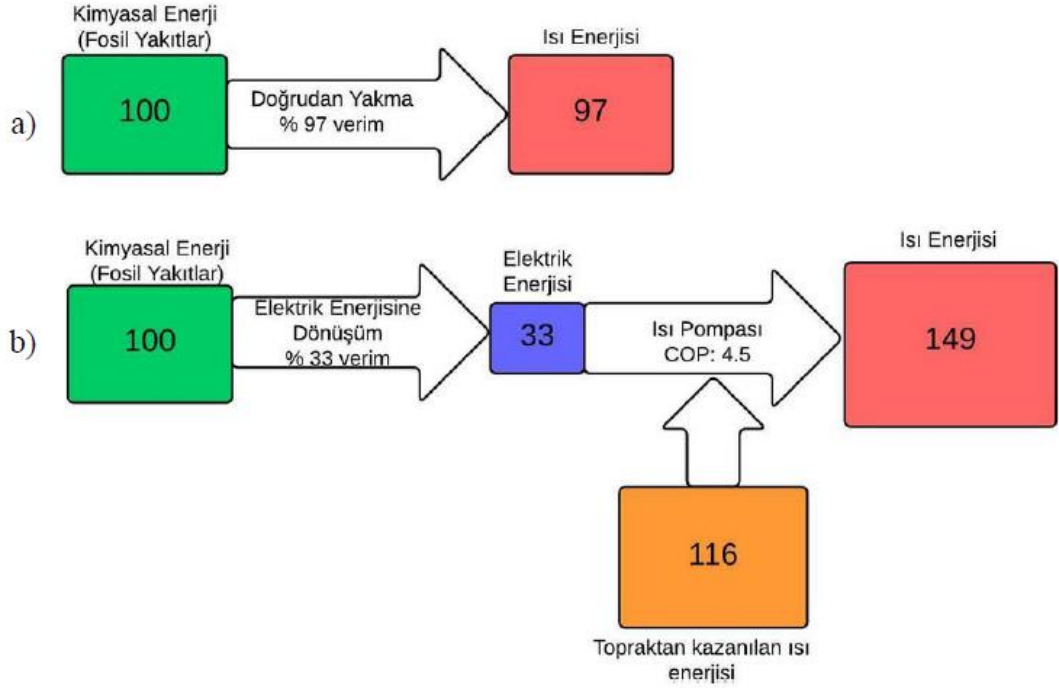
Tükenme ihtimalinin yanı sıra fosil yakıt kullanımı çevre açısından da çok zararlıdır. Bu yakıtların yanması sonucu atmosferde kükürt dioksit ( $SO_2$ ) ve karbondioksit ( $CO_2$ ) açığa çıkar. Bu gazlar da sera etkisine sebebiyet verip, küresel ısınma ve iklim değişikliklerine yol açmaktadır. Jeotermal enerji kullanımında ise sadece bu enerjinin çıkarılması esnasında harcanacak enerji dışında bir yanma olmayacağı için  $SO_2$  ve  $CO_2$  salınımları yok denecek kadar az dereceye inecektir. Şekil 2.3’de değişik enerji kaynaklarının birim kilowatt saat (kWh) enerji başına açığa çıkarttıkları  $CO_2$  emisyon değerleri gösterilmektedir. Bu tez çalışmasının konu kapsamında olan ısı pompaları ile enerji çıkarılması durumunda sadece ısı pompasının harcayacağı elektrik söz konusudur.



**Şekil 2.3:** Değişik enerji kaynaklarının kWh başına gram olarak  $CO_2$  emisyonları (Url-3).

Jeotermal enerji verimlilik açısından da klasik ısı enerjisi kaynaklarından daha üstündür. Jeotermal enerjiden yararlanma yollarından biri olan ısı pompası sistemlerinin verimini belirten performans katsayısı (COP), ısı pompasının pompaladığı enerjinin, tükettiği enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. COP değeri

4,5 olan standart bir toprak kaynaklı ısı pompası ile 1 birim elektrik enerjisi harcanarak 4,5 birimlik ısı enerjisi elde edilir. Şekil 2.4'te fosil yakıttan en iyi ihtimalle elde edilebilecek ısı enerjisi ile ısı pompası vasıtasıyla jeotermal enerjiden en kötü ihtimalle elde edilebilecek ısı enerjisi karşılaştırılması gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere ısı pompası ile jeotermal enerjinin kullanılması durumunda % 50 civarında verim sağlanması çok olağan bir durumdur(Aydın, 2015).



**Şekil 2.4:** a) Fosil yakıtlarının doğrudan yakılması ile ısı enerjisi üretilmesi, b) Fosil yakıtlardan üretilen elektrik enerjisi kullanan ısı pompası ile ısı enerjisi üretilmesi (Aydın, 2015).

Belirtilen bu verimliliğin son kullanıcı açısından maliyet hesabı incelenirse elde edilen kazanç daha rahat anlaşılabilir. Çizelge 2.1'de İğdaş tarafından sunulan, ısıtma amacıyla kullanılan enerji tipleri ve Mart 2016 tarihi için bu enerji türlerinden 1000 kcal ısı elde edebilmek için son kullanıcıya olan maliyetleri gösterilmektedir (Url-4). Çizelgede ülkemizde son yıllarda büyük oranda yaygınlaşan doğalgaz en ucuz enerji türü olarak göze çarpmaktadır. Fakat toprak kaynaklı ısı pompası ile 1000 kcal ısı enerji elde etmenin maliyeti hesaplanacak olursa:

COP değeri 4.5 olan standart bir toprak kaynaklı ısı pompası ile 1 birim elektrik enerjisi ile 4.5 birimlik ısı enerjisi elde edilir. 1000 kcal (1.16 kWh) ısı enerjisi elde etmek için  $1.16 / 4.5 = 0.258$  kWh elektrik enerjisi harcanacaktır. 1 kWh elektrik enerjisi maliyeti çizelgeden görülebileceği gibi 0.3318 TL/kWh olduğuna göre toprak kaynaklı ısı pompası ile 1000 kcal ısı enerjisi elde etmenin maliyeti  $0.258 \times 0.3318 =$

0.0856 TL olacaktır. Yani toprak kaynaklı ısı pompası ile jeotermal enerjiden yararlanılması durumunda, doğalgaz kullanımına göre son kullanıcıya % 37'lik bir ekonomik kazanç sağlanabilmektedir. Yine Çizelge 2.1'de görülen değerlere göre yapılan hesaplamalar ile COP değeri 3.2'nin üzerinde olan tüm cihazlar ile doğal gazlı sistemlerden daha ekonomik ısınma sağlanmasının mümkün olduğu görülmektedir (Aydın, 2015).

**Çizelge 2.1 : Son kullanıcıya yönelik birim ısıtma maliyetleri (Url-4).**

| No                                 | Yakıt Adı            | Isıl Değeri               | Birim Fiyatı             | Verim | TL/1000Kcal   |
|------------------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|-------|---------------|
| 1                                  | Doğalgaz (Konut)     | 8250 kcal/m <sup>3</sup>  | 1.0093 TL/m <sup>3</sup> | 90    | 0.1359        |
| 2                                  | Fuel-oil 4(K.Yakıtı) | 9700 kcal/m <sup>3</sup>  | 1.4400 TL/m <sup>3</sup> | 80    | 0.1856        |
| 3                                  | Linyit (İthal)       | 6000 kcal/kg              | 0.7380 TL/kg             | 65    | 0.1892        |
| 4                                  | Elektrik             | 860 kcal/kwh              | 0.3318 TL/kWh            | 99    | 0.3898        |
| 5                                  | Motorin              | 10200 kcal/kg             | 3.5119 TL/kg             | 84    | 0.4099        |
| 6                                  | Tüpgaz               | 11000 kcal/m <sup>3</sup> | 5.0494 TL/m <sup>3</sup> | 88    | 0.5216        |
| 7                                  | LPG Propan           | 11000 kcal/m <sup>3</sup> | 5.1654 TL/m <sup>3</sup> | 90    | 0.5218        |
| <b>Toprak Kaynaklı Isı Pompası</b> |                      |                           | <b>COP 4.5</b>           |       | <b>0.0856</b> |

Jeotermal enerjinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre de bir avantajı bulunmaktadır ki bu da rüzgâr veya güneş enerjisi gibi belli zaman dilimlerine ve belli jeolojik şartlara bağlı olmaksızın istenilen yer ve zamanda kullanılabilmesidir. Ayrıca toprağın belirli bir sıcaklıkta kalması, diğer enerji sistemlerine nazaran daha kararlı bir yapı olmasını sağlamaktadır.

Jeotermal enerji tüm dünyada başta ısıtma amaçlı olmak üzere, endüstri, kimyasal madde üretimi ve elektrik üretimi gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü 2013 yılı Ağustos ayı itibariyle 11766 MW'tır. Yıllık elektrik üretim miktarı ise yaklaşık 68,6 milyar kWh'tır. Türkiye ise, Alp-Himalaya kuşağında yer aldığından oldukça yüksek jeotermal potansiyele sahip olan bir ülkedir. Ülkemizin jeotermal potansiyeli teorik olarak 31500 MW'tır. Potansiyel oluşturan bu alanların % 79'ı Batı Anadolu'da, % 8,5'i Orta Anadolu'da, % 7,5'i Marmara Bölgesinde, % 4,5'i Doğu Anadolu'da ve % 0,5'i ise diğer bölgelerde yer almaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın % 94'ü düşük ve orta sıcaklıklı olup doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, mineral eldesi vs.) için uygun olup, % 6'sı ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur (Url-2).

Günümüzde jeotermal enerjiden direkt kullanım, jeotermal ısı pompaları aracılığıyla ve jeotermal enerji santralleri olmak üzere üç farklı şekilde yararlanılabilmektedir

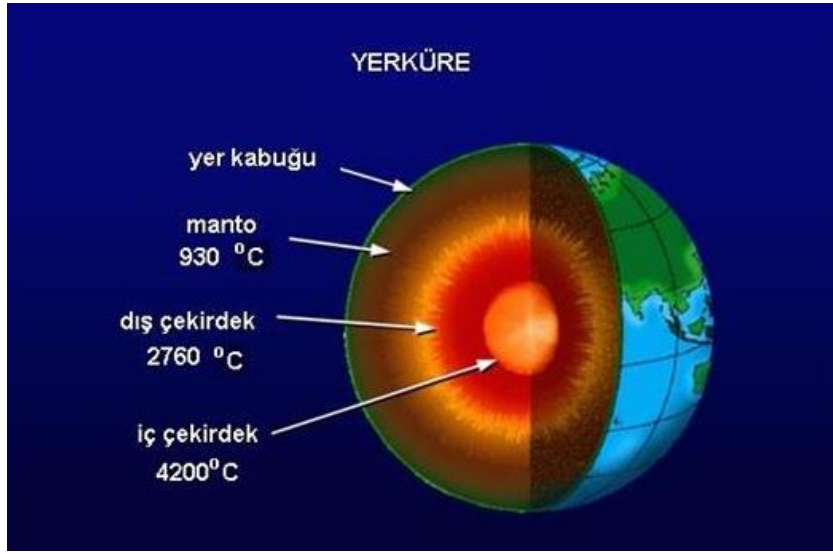
(Wachtel, 2010). Direkt kullanımda yüzeye yakın derinliklerde bulunan sıcak su kullanılır. Bazı bölgelerde yer altındaki sıcak su doğal yollarla yüzeye veya yüzeye yakın bölgelere çıkar. Suyun yüzeye çıktığı bölgeler kaplıca adını alırken, yüzeye yakın derinliklerde biriken sıcak su rezervlerine jeotermal rezerv denir. Kaplıca veya jeotermal rezervlerden alınan sıcak sulardaki ısı enerjisi basit sistemler ile yapıların ısıtılmasında kullanılması durumu ise jeotermal enerjiden direkt kullanım şeklinin yaygın bir örneğidir. Diğer bir jeotermal enerjiden yararlanma şekli ise jeotermal ısı pompaları diğer bir deyişle toprak kaynaklı ısı pompaları kullanımudur. Yer altına kurulan döngü sistemleri ile sığ derinliklerindeki sabit sıcaklıktan yararlanan ısı pompaları aldığı ısıyı yapı içerisindeki ısı dağıtıcılara göndererek ısıtma ve soğutma sağlayabilir. İlerleyen bölümlerde bu konuda daha ayrıntılı bilgi verilecektir. Jeotermal enerjiden yararlanmanın son şekli ise yer altındaki sıcak su ve buharı kullanarak elektrik üretimi yapan jeotermal enerji santralleridir. Diğer iki yöntemle göre daha karmaşık olan bu yöntem bu tezin konu kapsamında olmaması dolayısıyla daha fazla bilgi verilmeyecektir.

### **2.3 Sığ Derinliklerdeki Isı Enerjisi**

Jeotermal enerji, yer kabuğu tarafından toprağın katı yüzeyinin altında ısı şeklinde depolanmış olan enerji şeklinde tanımlanmaktadır (VDI 4640). Jeotermal enerjinin iki kaynağı mevcuttur. Bunun ilki dünyanın çekirdek tabakasıdır. Çekirdek tabakasında radyoaktif elementlerin yavaşça bozulması ve muazzam büyüklükteki yer çekimi basıncının yer altındaki mineral ve kayalar üzerindeki etkisi sonucu bu tabakada çok büyük sıcaklıklar oluşmaktadır. Bilim adamları hala net rakamlar vermemekle birlikte dünya çekirdeğinde bulunan bu sıcaklığın 3000-5000 °C civarında olduğunu tahmin etmektedirler (Omer, 2008). Çekirdekteki bu sıcaklık dolayısıyla yüzeye devamlı ısı akışı gerçekleşir. Devamlı gerçekleşen bu ısı transferinin etkisi ile toprak sıcaklığının her 100 m’de bir 3 °C arttığı bilinmektedir. Şekil 2.5’te yer küre katmanları ve tahmini sıcaklıkları gösterilmektedir.

Topraktaki ısı enerjisinin diğer bir kaynağı ise güneştir. Fakat güneş ışınları sayesinde elde edilen ısı enerjisinin etki ettiği alan zeminin ilk 5-10m’lik kısmı ile sınırlıdır. Bu seviyeden itibaren artan ısı atalet ile toprak sıcaklığı mevsimsel değişikliklerden etkilenmez ve yıl boyunca sabit kalır. Bölgeye göre değişiklik gösterebilen bu sıcaklık, o bölgenin kış mevsimi ortalama sıcaklığından yüksek, yaz mevsimi ortalama hava

sıcaklığından ise az olmaktadır. Bu konuda İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nde bir çalışma yapılmış, enstitü bahçesinde açılan farklı kuyularda zemin sıcaklıkları 2012 yılından başlamak üzere halen ölçülmekte ve kaydedilmektedir (Aydın, 2015). Şekil 2.6'da bu çalışmalardan elde edilen 2013 yılına ait ortalama zemin sıcaklıkları grafiği gösterilmektedir. Şekilden anlaşılabileceği üzere İstanbul Maslak bölgesinde 7 m derinlikten itibaren toprak sıcaklığı 16,6 °C olarak yıl boyu sabit kalmaktadır. Elde edilen bu grafik, dünyanın herhangi bir bölgesi için sayısal değer olarak farklılık gösterse dahi, şekil itibari ile aynı yapıda olacaktır.

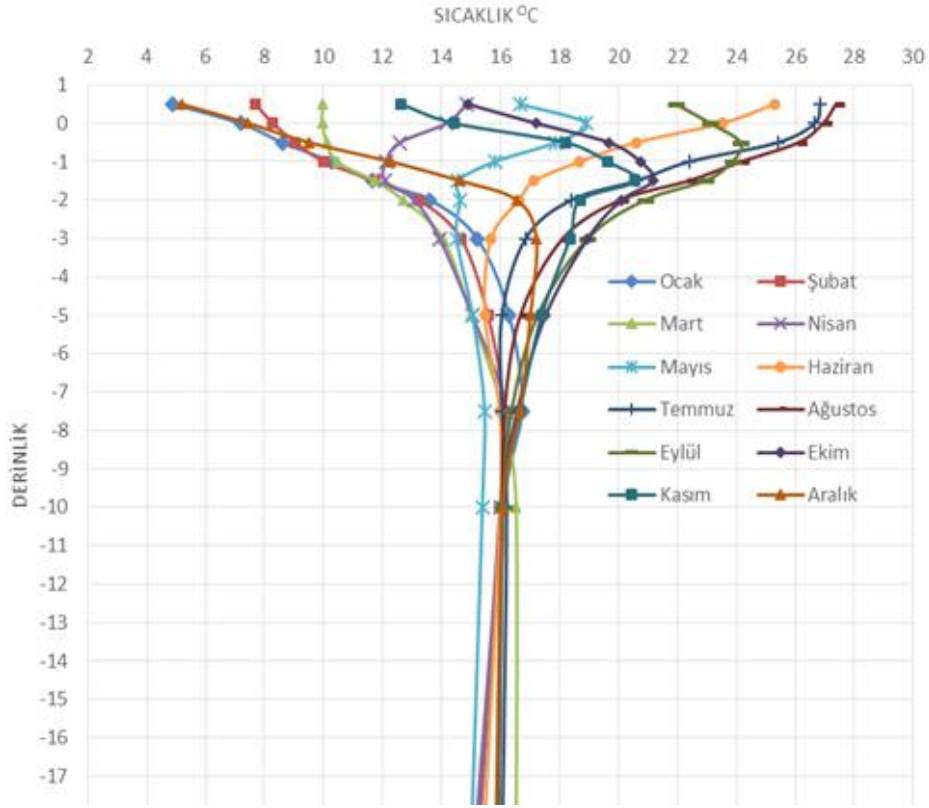


**Şekil 2.5:** Yer küredeki sıcaklık dağılımı (Url-5).

Toprak kaynaklı ısı enerjisinin ucuz, temiz ve öz kaynak olması, hava kirliliği yaratmaması, döviz tasarrufu sağlaması ve ayrıca bu enerjinin kullanılmasıyla yapılan yatırımların geri ödeme sürelerinin kısa olması gibi nedenlerden dolayı konut ısıtmasına yönelik uygulamaları giderek hızla artmaktadır (Gecesefa, 2012).

## **2.4 Zemin Kaynaklı Isıtma ve Soğutma Sistemleri**

Zeminin yüzeyine yakın derinlikte bulunan sabit ısı gelişen teknolojiler yardımıyla son yıllarda yapıların ısıtılıp soğutulmasında kullanılabilmektedir. İlerleyen bölümlerde açıklanacak olan ısı pompası ile yazın yapılardaki sıcak hava emilip zemine, kışın ise zemindeki sıcaklık emilip yapıya gönderilir. Bu sistemler açık ve kapalı döngü sistemler olmak üzere iki ana başlığa ayrılırlar.



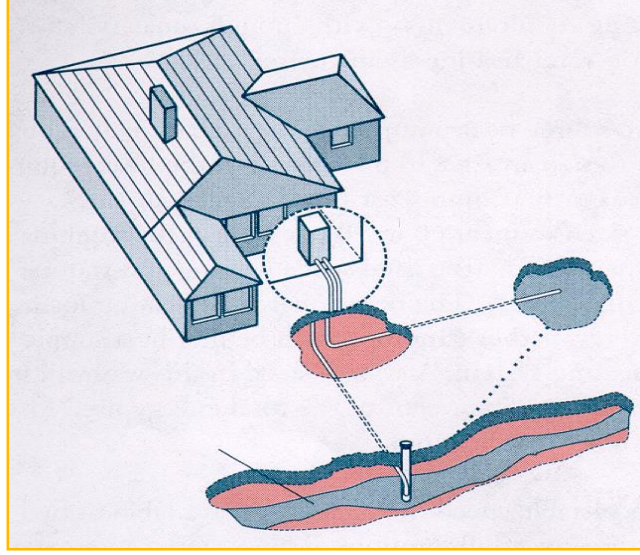
**Şekil 2.6:** *İstanbul/Maslak* bölgesinde toprak sıcaklığının farklı aylarda derinlik ile değişimi (Aydın, 2015).

#### 2.4.1 Açık döngü sistemler

Açık döngü sistemler ısı kaynağı olarak göl, nehir gibi yüzey sularını veya yer altındaki su akışlarını ve akiferleri kullanırlar. Açık döngü olarak adlandırılmalarının sebebi ise ısı değiştirici sıvı olarak da doğrudan kaynaktaki suyu kullanmalardır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi bir kuyudan pompalanan su, yapı içerisindeki ısı pompasına çekilerek yapının ısıtılması veya soğutulmasına göre ısısı çekildikten veya ısı enjekte edildikten sonra farklı bir kuyudan tekrar çekilen kaynağına geri bırakılır. Yine ısı değiştirici sıvı olarak kaynaktaki suyu kullanmalarından ötürü kapalı döngü sistemlere nazaran daha verimlidirler.

İlk kurulum maliyetleri de kapalı döngü sistemlere nazaran daha ucuz olan bu sistemlerin kullanılması için göz önünde bulundurulması gereken birkaç nokta vardır. Bunlardan ilki kullanılan suyun kimyasına bağlı olarak barındırabileceği korozyon maddeleridir. İkincisi ise ulaşılabilen suyun miktarıdır. Bu noktada göl, nehir gibi su birikintileri yerine eğer yer altı suyu kullanılacak ise zeminin yeterli geçirgenliğe sahip

olması gerekir. Üçüncü önemli faktör ise su sistemini geri beslemek için ne yapacağınızdır. Yer altı suyu ya ayrı kuyular ile zemine geri enjekte edilmeli ya da göl veya nehir gibi yüzey sularına akıtılmalıdır. Son olarak ise sistemin kullanılacağı bölgedeki yerel kanun ve düzenlemeler incelenmelidir zira bunlar sistemin fizibilitesini etkileyebilir (Omer, 2008).



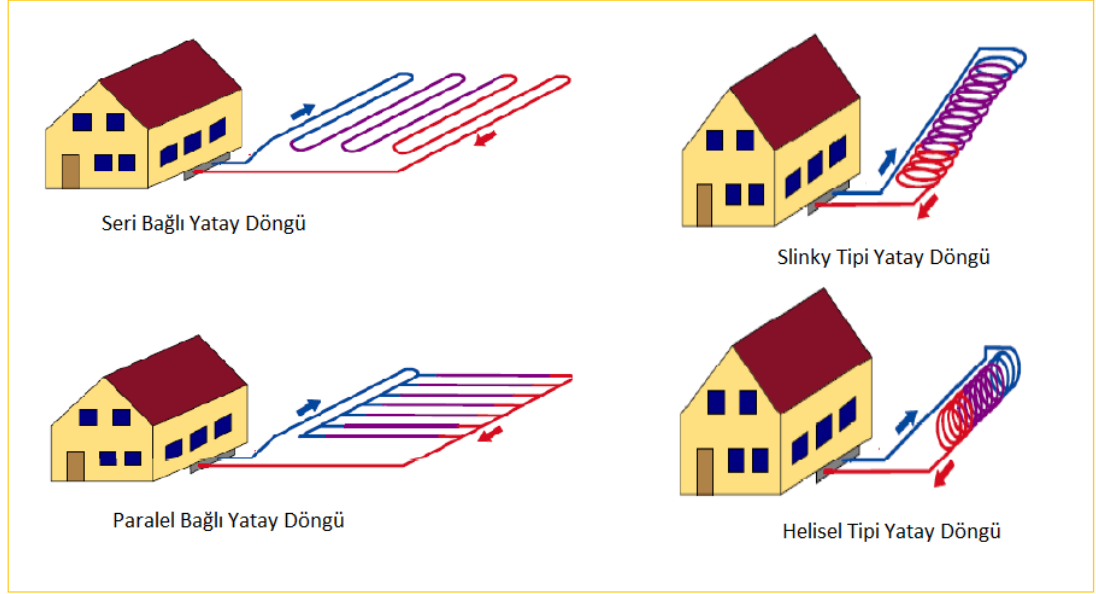
**Şekil 2.7:** Açık döngü sistem uygulaması (Minister of Natural Resource Canada, 2004).

#### 2.4.2 Kapalı döngü sistemler

Kapalı döngü sistemler zemin ile ısı alışverişini ısı pompasına bağlı PE boru döngüleri ile gerçekleştirir. Borular içerisinde su veya su-antifriz karışımı önceki yıllarda doğrudan yapıya pompalanarak pasif ısıtma/soğutma olarak işlem yapılırken son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte ısı pompasına gönderilerek aktif ısıtma/soğutma gerçekleştirilir ki bu şekilde daha verimli bir şekilde enerji elde etmek mümkündür.

Kapalı döngü sistemler de kendi içerisinde yatay ve düşey kapalı sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Yatay döngü sistemler adından da anlaşılacağı gibi PE boruların yüzeye nispeten yakın derinliklerde zemine yatay olarak döşendiği sistemlerdir. Yatay döngülerde, boruların yerleştirilmesi için geniş alanlara ihtiyaç vardır. Bunun yanında zeminde derin kazılar gerektirmediği için kurulum maliyetleri düşey döngü kapalı sistemlere nazaran daha düşüktür. Fakat yine derinlere inilmemesi sebebiyle zeminin daha derinlerdeki sabit ısısından yeteri kadar yararlanamazlar dolayısıyla verimleri daha düşüktür.

Şekil 2.8’de farklı tipteki serme örnekleri gösterilen yatay döngü sistemlerinden, seri bağlı ve paralel bağlı döngüler PE boruların zemine ızgara şeklinde yerleştirilmesi ile elde edilir. Aralarındaki fark ise, seri bağlı döngü de sıvı döngüsü tek bir kanal üzerinden gerçekleştirilirken, paralel bağlı döngü sistemlerde sirkülasyon sıvısının izlediği yol birden fazla kanala bölünüp, daha sonra tekrar bir kanal üzerinde yapıya dönmesi ile tamamlanır.



**Şekil 2.8:** Kapalı döngü yatay sistem uygulama örnekleri (Minister of Natural Resource Canada, 2004).

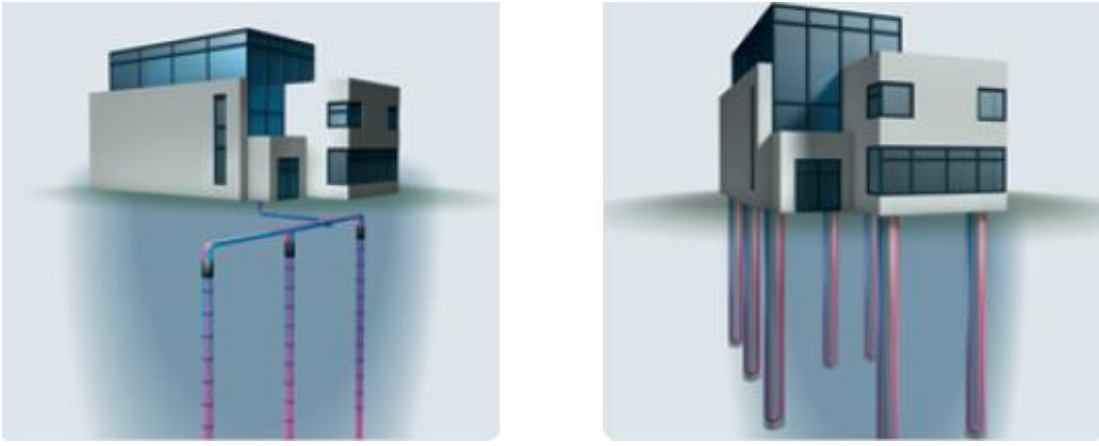
Slinky adı verilen sistem PE boruların zemine yatay ve birbirine temas eden halkalar şeklinde yerleştirilmesi ile oluşturulur. Helisel (sarmal) adı verilen döngü sistemi ise zemine dik şekilde konumlandırılan ve birbirine seri bağlı halkalardan oluşan silindirik bir yapının zemine yatay olarak yerleştirilmesi ile oluşur.

Yatay döngü sistemlerini yerleştirmek için kazılan zemin, sistem yerleştirdikten sonra örselenmiş halde geri serilir. Bu aşamada boruların zarar görmemesine özen gösterilmesi gerekir. Özellikle helisel tipli borularda geri serme zahmetli ve riskli olmaktadır (Aydın, 2015).

Kullanılabilir alanın kısıtlı olması durumunda düşey döngü boru sistemi kullanılır. PE borular zemine açılan kuyulara düşey olarak yerleştirilir. Ardından kuyu bentonit veya harç gibi yüksek ısı iletimine sahip malzeme ile doldurulur. İsveç’te sert ve billuri kayalarda açılan kuyular genellikle açık bırakılır ve yer altı suyu boru ile kayalar

arasında ısı transferini gerçekleştirir (Omer, 2008). Ortalama kuyu çapı 10-15 cm, derinliği ise 50-200 m arasındadır.

Yatay döngü borularda olduğu gibi düşey döngü borularda da farklı tipte boru geometrileri kullanmak mümkündür. Genellikle U-tüp adı verilen ve alttan 180°'lik dönüş ile birbirine bağlanmış gidiş ve dönüş borularından oluşan sistemin yaygın olmasının yanı sıra, birden fazla U-tüp borusunun kuyuya yerleştirilmesi veya helisel tipi döngülerin kullanılması da giderek yaygınlaşmaktadır. Ayrıca eş merkezli (koaksiyel) gidiş dönüş borularının kullanıldığı durumlarda mevcuttur. Enerji kazıkları da kapalı düşey döngü sistemlerinin bir çeşididir. Şekil 2.9'da kapalı düşey döngü sistem türlerinden enerji kuyusu ve enerji kazığı örnekleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.9:** Kapalı döngü sistem uygulamaları (Uponor, 2012).

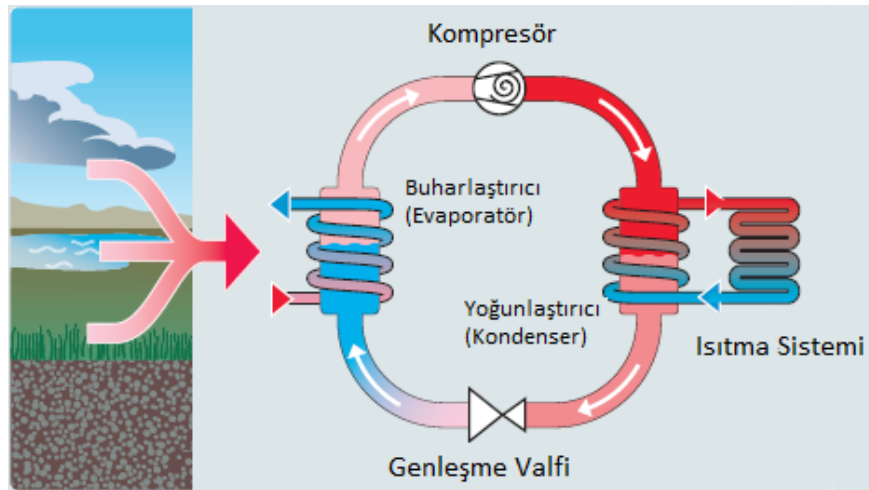
## 2.5 Isı Pompaları

Enerji kazığı veya herhangi bir toprak kaynaklı ısı değişim sistemi kullanımında önemli bir detay vardır. Yapının kışın ısıtılması veya konfor sıcaklığında sabit kalabilmesi örnek durumu ele alınacak olunursa, zeminden çekilen ısı kendinden daha yüksek enerjili bir ortama aktarılmak istenmektedir. Fakat burada doğal bir engel ortaya çıkar. Farklı sıcaklıktaki iki ortam arasındaki doğal ısı akışı, termodinamiğin ikinci kanunu gereğince sıcak ortamdaki soğuk ortama doğru gerçekleşir. Bu durumun tersinin gerçekleşmesi için dışarıdan bir etki gerekir ki bu ancak ısı pompaları ile sağlanabilir. Isı pompaları kaynak olarak kullandığı düşük sıcaklıktaki ortamdan aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki ısıtılmak veya sıcak tutulmak istenen ortama aktarır. Evlerimizde kullandığımız buzdolapları ve klima cihazları da bir çeşit ısı pompasıdır.

Isı pompaları soğutma çevrimi prensibine göre çalışır. Bu çevrimi gerçekleştirmek için kendisini meydana getiren dört ana bileşeni kullanır. Bunlar buharlaştırıcı (evaporatör), kompresör, yoğunlaştırıcı (kondenser) ve genleşme valfidir. Çevrim bu bileşenler arasında dolaştırılan soğutucu akışkan adı verilen akışkan ile sağlanır.

Şekil 2.10’da bileşenleri ile birlikte ısı pompası çalışma şeması gösterilmektedir. Buharlaştırıcı içinde bulunan düşük sıcaklıktaki ve düşük basınçtaki soğutucu akışkan, kaynaktan alınan ısı enerjisi ile ısınarak buharlaşır. Ardından kompresöre gelen buhar halindeki akışkan burada sıkıştırılarak basıncının ve sıcaklığının artması sağlanır. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ile yoğunlaştırıcıya gelen soğutucu akışkan, burada tesisattan gelen kendinden düşük sıcaklıktaki ısıtıcı akışkana ısı aktararak sıcaklığı düşer ve tekrar sıvı hale geçer. Son olarak genleşme valfine gelen akışkan kompresörde kazandığı yüksek basıncın düşürülmesi ile soğuyarak tekrar ısı alabilecek hale gelerek buharlaştırıcıya ulaşır ve döngü tamamlanır.

Zemin kaynaklı ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan ısı pompaları kışın yapıların ısıtılması için zemini ısı kaynağı olarak kullanırken, yazın tersine çalışarak yapıdaki ısıyı çekerek zemine aktarır. Hava kaynaklı ısı pompası sınıfına giren buzdolapları ve klima sistemleri ise soğutulmak istenen ortamdaki sıcaklığı çekerek dış ortama aktarır.

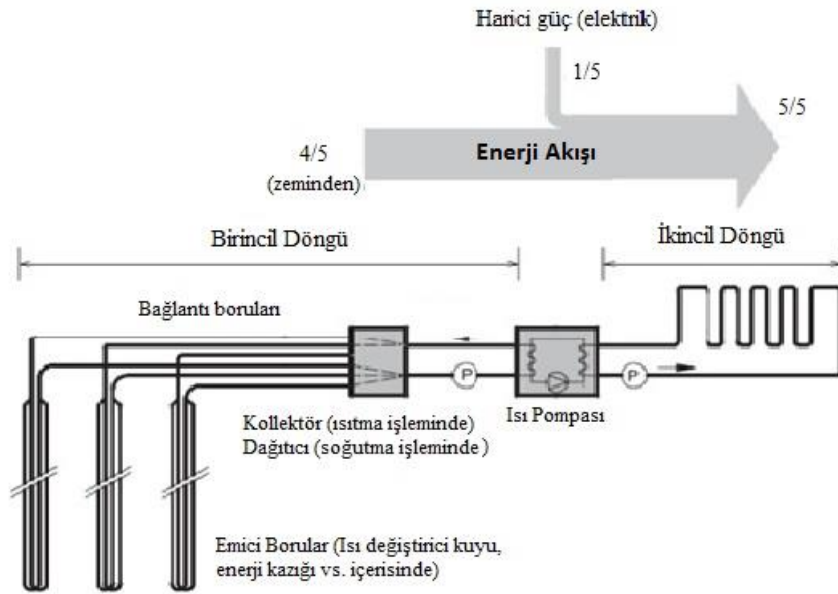


**Şekil 2.10:** Isı pompası çalışma şeması (Uponor, 2012).

Isı pompalarının verimliliği performans kat sayısı ile ölçülür. Boyutsuz bir sayı olan performans katsayısı elde edilen ısı enerjisinin, o enerjiyi elde etmek için tüketilen enerjiye oranı olarak tanımlanır.

$$\text{COP} = \frac{\text{Isı pompasından elde edilen enerji}}{\text{Isı pompası işletimi için gereken enerji}} \quad (2.1)$$

Isı pompalarında ısıtma ve soğutma durumları için ayrı olarak hesaplanır. Örnek olarak performans katsayısı 5 olan bir ısı pompası, 1 birimlik enerji sarfıyatı ile 5 birimlik ısı enerjisi sağlar (Şekil 2.11).



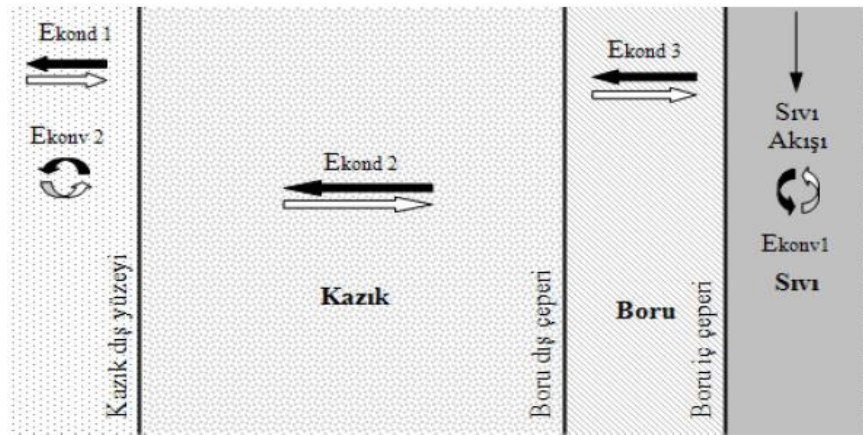
**Şekil 2.11:** Zemin kaynaklı ısı pompası ile ısı transfer şeması (Brandl, 2006).

## 2.6 Isı Transferi

Isı transferi iki sistem arasındaki sıcaklık farkına bağlı enerji aktarımıdır. Bir ortam içerisinde veya ortamlar arasında, sıcaklık farkı mevcut olan her durumda ısı geçişi mutlaka sağlanır. Isı transferi üç ana mekanizma ile gerçekleşebilir. Bunlar iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıyım yoluyla ısı transferleridir. Isı iletimi katı veya akışkan bir durgun ortam içerisinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, moleküler etkileşim yoluyla gerçekleşen ısı geçişidir. Isı taşınımı ise farklı sıcaklıklardaki bir yüzey ile hareketli bir akışkan arasında gerçekleşen ısı transferidir. Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeylerin elektromanyetik dalgalar halinde enerji yayması sonucu gerçekleşen ısı transferine de ısı ışıyımı denir (Incopera, 2007).

### 2.6.1 Zemin içerisinde ısı transferi

Zemin içerisindeki ısı transferinin temel mekanizması ısı iletimidir. Ancak yer altı suyu akışı olduğu durumlarda taşınım da ısı transferinde önemli rol oynar. Işınım ise zemin içerisinde ihmal edilebilecek seviyede gerçekleşir. Enerji kazıklarında ise beton içerisinde ve betonla PE borular arasında iletim ile ısı transferi gerçekleşirken, borular içerisinde ise taşınım ile ısı transferi mevcuttur. Şekil 2.12’de gösterilen zeminden ısı elde etme aşamasındaki ısı transfer şemasında beyaz oklar yapının ısıtılması için zeminden ısı alınması esnasındaki ısı akış yönünü, siyah oklar ise yapının soğutulması için zemine ısı aktarılması durumunu göstermektedir.



**Şekil 2.12:** Zemin-kazık arasındaki ısı hareketinin şematik gösterimi (Ölçeksiz)  
(Olgun ve diğ., 2010).

### 2.6.2 Zemin içerisinde ısı transferine etki eden parametreler

Zemin kaynaklı ısıtma-soğutma sistemi tasarlarken zeminin ısı parametrelerinin bilinmesi hayati değer taşır. Bu parametreler tam olarak belirlenmeden tasarım aşamasına geçilmesi durumunda gereksiz sistem büyüklüğüne sahip veya ihtiyacı karşılamayan yetersiz tasarımlar yapmak mümkündür ki iki durum da mali açıdan israf manasına gelir.

Zeminin ısı transferi potansiyeli ısıl yayılım katsayısı ( $\alpha$ ) ile ifade edilir. Sıcaklık dalgalarının zemin hacmi içerisindeki yayılma hızı olarak tanımlanan ısıl yayılım katsayısı, üç ana parametreye bağlı olarak değişir:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} (m^2 / s) \quad (2.2)$$

Burada  $\lambda$  zeminin ısı iletkenliğini ifade ederken,  $\rho$  yoğunluğunu,  $C_p$  ise spesifik ısı kapasitesini ifade eder. Zemindeki ısı transferinin büyük kısmının iletim ile gerçekleşmesi sebebiyle ısı iletkenlik zeminde ısı transferini etkileyen en önemli parametredir. Bu parametreyi etkileyen en önemli faktörler ise zeminin yoğunluğu ve su muhtevasıdır ki zeminin ısı iletkenliği bu iki parametre ile doğru orantılı olarak değişir. Ayrıca zemindeki suyun donması veya buz halinde iken çözünmesi de zeminin ısı iletkenliğini etkiler. Ancak zemin kaynaklı ısı transfer sistemlerinde bunlar kullanılması değil önlenmesi gereken durumlardır. Zeminin ısı iletkenliğini belirlemek için ısı tepki testi uygulanır. Bu test ileriki bölümde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Zeminden ısı transferini etkileyen bir diğer parametre olan spesifik ısı kapasitesi bir maddenin birim kütlesini bir derece arttırmak için gerekli enerji olarak tanımlanır. Spesifik ısı laboratuvar ortamında farklı sıcaklıklardaki su ve zeminin karıştırılması ile bulunabilir. Kullanılan birim sistemine göre J/kgK veya J/gC şeklinde ifade edilebilir (Brandl, 2006).

## **2.7 Isı Tepki Testi**

Zemin kaynaklı ısıtma ve soğutma sistemlerinde sistem performansını etkileyen en önemli faktör zeminin ısı iletkenliğidir. Zemin ısı iletkenlikleri belirli koşullar için literatürden elde edilebilir olsa dahi yer altında zemin formasyonlarının çok hızlı değişebilme potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda büyük çaplı projeler için arazi deneyleri ile belirlenmesinin önemi büyüktür. Zeminin ısı iletkenliğini belirlemek için yapılan teste ısı tepki testi (ITT) denir.

Literatürde termal tepki testi, jeotermal tepki testi gibi isimlerle anılan bu testte zemine ısı verilerek zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri izlenir. Bu test ile sadece zemin ısı iletkenliği değil, kuyu ısı direnci ve örselenmemiş zemin sıcaklığı da belirlenebilir.

Kuyu ısı direnci zeminde ısı taşıyıcı akışkana olan sıcaklık kaybını tanımlar. Kuyu ısı direnci ile zemin kaynaklı ısı değiştiricinin performansı ters orantılı olarak değişir. Kuyu çapı, boru boyu ve geometrisi, boru malzemesi, dolgu malzemesi, ısı taşıyıcı akışkan ve akışkan türü (laminer veya çalkantılı akış) kuyu ısı direncini etkileyen parametrelerdir (Url-6).

Sırasıyla Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü’nde toprak kaynaklı ısı pompaları test ve araştırma laboratuvarında kurulan ısıl tepki test istasyonunun şeması ve sistem elemanları görülmektedir. Test, sistemin test yapılacak kuyuya bağlanması ve su tankı içerisindeki rezistanslarla ısıtılan suyun dolaştırılması ile gerçekleştirilir. Sabit sıcaklıklı veya sabit ısı akıllı olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Sabit sıcaklıklı testte belirli bir dereceye ısıtılan su sabit sıcaklık ile zemine gönderilirken, sabit ısı akıllı testte ise suya sabit oranda ısı verilerek zemine gönderilir. Testlerin uzun süreli olması sebebiyle sisteme eklenen veri kaydedici ile kuyuya gönderilen ve dönen suyun su sıcaklıkları ile akış debisi aralıklarla kaydedilir.

Olması gereken minimum test süresi Gehlin tarafından 48-50 saat olarak önerilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, testin ilk anlarında ısı değiştirici sıvı ile zemin arasındaki sıcaklık farkından dolayı birim ısı transfer değerleri çok yüksek çıkar ve ardından belli bir dengeye ulaşarak düşmeye başlar. Bu nedenle Gehlin erken saatlerindeki verilerin değerlendirmeye katılmamasını önermektedir. Es geçilmesi gereken süreyi için ise şu bağıntıyı önermektedir (Gehlin, 2002):

$$t_b = \frac{5r^2}{\alpha} \quad (2.3)$$

Burada  $t_b$  olması gereken minimum ITT süresini ifade ederken,  $r$  kuyu yarıçapını,  $\alpha$  ise zeminin ısıl yayılım katsayısını ifade etmektedir.

Zemin ısı değiştirici sistemin türüne göre sonuçlar farklı yaklaşımlar ile yorumlanabilir. Bunlardan en yaygın kullanılan ve en basiti çizgi kaynak modelidir. Bu modele göre ısıl iletkenlik şu bağıntı ile hesaplanır:

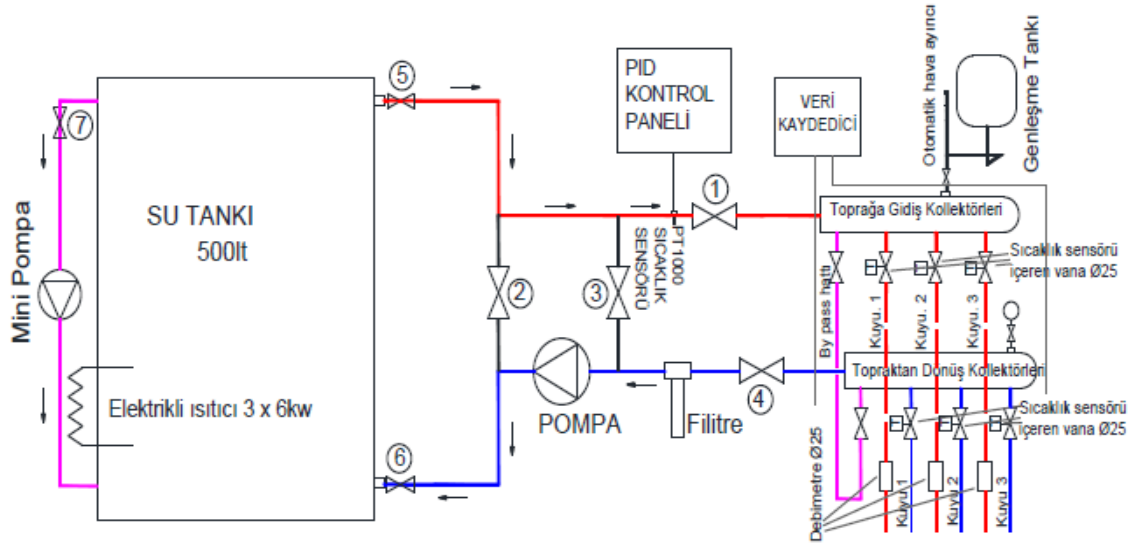
$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi Hk} \quad (2.4)$$

Burada  $\lambda_{eff}$  efektif ısıl iletkenliği,  $Q$  aktarılan veya çekilen ısı miktarını,  $H$  kuyu boyunu,  $k$  ise ITT’de kaydedilen veriler aracılığı ile çizilen sıcaklık-logaritmik zaman grafiğinin eğimini temsil etmektedir. Bu noktada enerji kazıklarına uygulanması ile ilgili bazı uyumsuzluklar vardır. Çizgi kaynak modeli kullanımının uygun olduğu enerji kuyularına oranla limitli boyu ve daha geniş kalınlığı ile enerji kazıkları için farklı yöntemler önerilmektedir. Bu noktada silindirik kaynak metodu öne

çıkılmaktadır. Enerji kazıkları için tavsiye edilen analitik ve sayısal modeller ile sonuçların yorumlanması için önerilen metotlar literatür özeti kısmında açıklanacaktır.



Şekil 2.13: Isıl tepki testi elemanları (Gültekin, 2014).



Şekil 2.14: Isıl tepki testi şeması (Gültekin, 2014).

ITT için dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlardan birincisi ısıl tepki testinde sadece toprağın bir kısmı test edildiği için çıkan sonuç sadece o bölgedeki ısıl iletkenlik değerini vermektedir. Ayrıca kuyuda farklı özellikte toprak tabakaları olabileceği için elde edilen değer *efektif değer* olacaktır (Aydın, 2015). Test aşaması için dikkat edilmesi gereken noktalardan biri ise enerji sürekliliğinin sağlanması ve mümkün olduğu kadar sabit tutulmasıdır.

### **3. ENERJİ KAZIKLARINDA ISIL PERFORMANSIN PARAMETRİK İNCELENMESİ**

Farklı parametrelerin ve kazıklar arası mesafenin enerji kazıklarının ısı performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi hem ekonomi hem de zaman açısından mantıklı olmamaktadır. Bu nedenle bu tarz konularda sayısal modelleme çalışmaları öne çıkmaktadır. Bu tez kapsamında da ısı değiştirici boru çapı, sayısı, kazık içerisindeki konumu ve kazık çapı parametreleri ile kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin enerji kazıklarının ısı performansına etkisini incelemek için sayısal modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

#### **3.1 Model Tanımlamaları**

Bu bölümde Comsol programında gerçekleştirilen analizler için kullanılan model ve parametreler tanımlanmıştır.

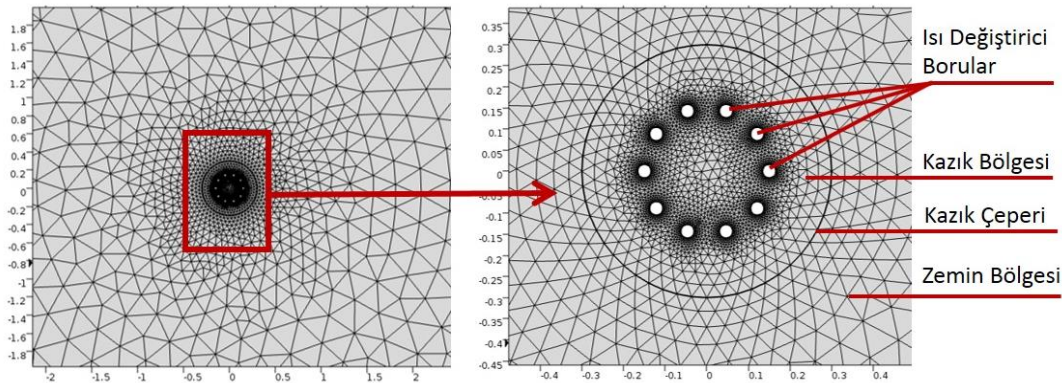
Comsol farklı disiplinleri bünyesinde barındıran, herhangi bir fizik denklemini benzetim yoluyla çözebilen çoklu fizik yazılımıdır. Bu yazılım temel fizik problemlerinden, mühendislik problemlerine, biyoteknolojiden, nanoteknolojiye, jeofizikten astrofiziğe kadar pek çok sahada kullanılmaktadır. İçeriğindeki standart bulunan ısı transfer modülü, akustik modülü, kimya mühendislik modülü vb. çeşitli hazır modüller ve her bir modülün nasıl kullanılacağını gösteren geniş kapsamlı bir kullanım kılavuzu (User Guide) ile bir, iki veya üç boyutlu simülasyonlar yapılabilmektedir (Ömür, 2015).

Gerçek ısı transfer durumunu birebir benzetim yoluyla analiz edebilmek için üç boyutlu ısı transfer modellemesi önerilmektedir. Ancak bunun için hem güçlü bir bilgisayar donanımına hem de uzun süreli benzetim analizlerine ihtiyaç duyulması sebebiyle modelleme aşamasında bazı basitleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu konuda Gültekin (2014)'in çalışmasında kullanıp geçerliliğini deneysel testler ile onayladığı modelleme yöntemi referans alınmıştır. Buna göre; modellemede ısı transferi için iki boyutlu kazık kesitleri tanımlanmıştır. Kazık içerisindeki dolaşım boruları boş olarak tanımlanarak, giden ve dönen sıvı sıcaklıkları Aydın (2015)'in İstanbul Teknik

Üniversitesi Enerji Enstitüsünde yaptığı enerji kuyuları arazi deneylerinden elde edilen ortalama değerlerden seçilerek boru sınır bölgelerinde başlangıç sınır koşulu olarak tanımlanmıştır.

Zemin bölgesi, 5 m yarıçapına sahip dairesel bir bölge olarak kabul edilmiş, zeminin doğal sıcaklığı yine Aydın (2015)’in İstanbul Maslak bölgesi için belirlediği ortalama sıcaklık (16 °C) zemin bölgesine ve bölge dış yüzeylerine başlangıç sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. İlerleyen bölümlerdeki sonuçlardan da görülebileceği üzere yapılan analizler sonucunda 5 m yarıçapına sahip zemin bölgesinin sınırlarında sıcaklık değişimleri gözlemlenmemiş, bu da seçilen zemin genişliğinin yeterli olduğunu göstermiştir. Kazık betonunun birim hacim ağırlığı da Aydın (2015)’in çalışmalarına paralel olarak bentonitli beton kullanımına göre  $1600 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır. Modellemelerde kullanılan diğer tüm sabit parametreler literatürden uygun değerler olarak seçilmiştir. Bu parametreler Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Sonlu elemanlar model ağı Cmsol yazılımı tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur. Modelleme için üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Yazılım, kullanıcıya model yapısını “aşırı kaba (extremely coarse)” ve “aşırı ince (extremely fine)” arasında toplam 9 farklı seçenekte oluşturma imkânı sunmaktadır. Bunun neticesinde, modeli oluşturan elemanların sayısı, dolayısıyla çözüm hızı ve sonuçların hassasiyeti değişmektedir. Tez kapsamındaki analizler “daha ince (finer)” olarak adlandırılan üçüncü derece incelikte modellemeler ile gerçekleştirilmiştir. Modellerdeki eleman sayısı tek kazık analizlerinde kazık kesitlerine bağlı olarak 320 ila 850 arasında değişirken, birden fazla kazığın olduğu analizlerde 16806’ya kadar çıkmıştır. Örnek bir modelleme ağı Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.1:** Cmsol modeli ve ağ yapısı.

İki boyutlu modelleme, beraberinde bazı varsayımları mecbur kılmaktadır. Modellemede yapılan varsayımlar aşağıda listelenmiştir.

- Zeminin, kazık betonunun ve ısı taşıyıcı akışkan sıvının özellikleri izotropiktir.
- Yer altı suyu akışı ihmal edilebilir seviyededir.
- Düşey doğrultudaki sıcaklık dağılımının etkisi ihmal edilmiştir.
- Hiçbir bölgede ısı enerjisi üretimi yoktur.

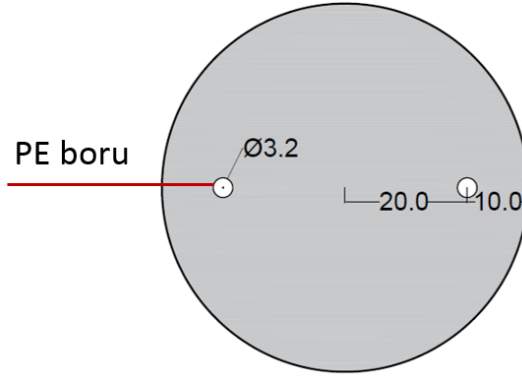
Analizler 50 saatlik sabit sıcaklıkta ısı tepki testi varsayımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ise birim uzunluk başına ısı akışı (W/m) şeklinde elde edilip buna göre karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Comsol analizlerinde kullanılan sabit parametreler.

| Parametre                       | Birimi            | Değeri |
|---------------------------------|-------------------|--------|
| Zemin bölgesi yarıçapı          | m                 | 5      |
| Zemin ısı iletkenliği           | W/(m K)           | 2      |
| Zemin birim hacim ağırlığı      | kg/m <sup>3</sup> | 2150   |
| Zeminin özgül ısı kapasitesi    | J/(kg K)          | 900    |
| Kazık betonunun ısı iletkenliği | W/(m K)           | 1.5    |
| Betonunun birim hacim ağırlığı  | kg/m <sup>3</sup> | 1600   |
| Betonun özgül ısı kapasitesi    | J/(kg K)          | 880    |
| Zeminin doğal sıcaklığı         | °C                | 16     |

### 3.2 Parametre İncelemeleri

Bu bölümde ideal ısı transferi performansını elde edebilmek için gerçekleştirilen parametre analizleri açıklanacaktır. İlk olarak kazık yarıçapı 30 cm olarak sabit tutularak, ısı değiştirici boruların merkezi ile kazık merkez noktası arasındaki mesafe değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekil 3.2’de 4.vaka olarak adlandırılan kazık eksenini ile boru eksenini arasındaki mesafenin 20 cm olduğu durumdaki en kesit gösterilirken, analiz yapılan diğer aralıklar 4, 10 ve 15 cm olmuş bunlar sırasıyla 1., 2. ve 3. vaka olarak adlandırılmıştır. Bu analizlerde tek U-tüp döngü kullanılmıştır.



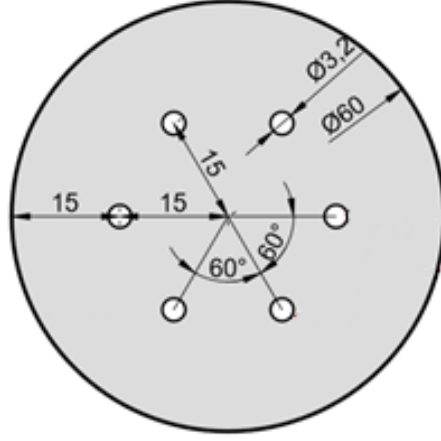
**Şekil 3.2:** 4. vaka analizinde kullanılan kazık kesiti.

Bir sonraki karşılaştırmalar dolaşım borusu merkezi ile kazık dış çeperi arasındaki mesafe sabit kalmak şartıyla (10cm), kazık çapının değiştirilmesi ile yapılmıştır. Bu karşılaşmada 4. vakaya ek olarak kazık yarıçaplarının 40, 50 ve 60 cm olduğu 5., 6. ve 7. vaka olarak adlandırılan analizler gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki analiz dolaşım borusu çapları ile alakalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için 3. vaka (30 cm kazık yarıçapı ve 1.6 cm boru çapı) referans seçilmiş, kazık çapı sabit tutularak 8. ve 9. vaka olarak adlandırılan, sırasıyla 1,25 cm ve 2 cm yarıçapına sahip borulu kazıkların analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu aşamaya kadar tek U-tüp borulu kazıklar ile yapılan karşılaştırmalardan sonra U-sayısının ısı transfer performansına etkisini araştırmak için U-tüp sayısının artırıldığı analizlere geçilmiştir. Yine 3. vaka referans alınmış, ardından çift U, 3U, 4U ve 5U-tüp borular içeren kazıklar ile analizler yapılmıştır. Bu analizler sırasıyla 10., 11., 12. ve 13. vaka olarak adlandırılmıştır. Her bir analizde boru merkez eksenini ile kazık merkez eksenleri arasındaki fark 15 cm iken, borular sayılarına göre aralarındaki açılar birbirine eşit olacak şekilde yerleştirilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.3’de 11. vakaya konu olan 3U-tüp boru içeren kazığın kesiti gösterilmektedir.

Son olarak farklı U-tüp sayılarındaki farklı boru merkezi-kazık merkezi aralıklarını inceleyebilmek için 3U-tüp borulu ve 5-U-tüp borulu kazıklarda analizler gerçekleştirilmiştir. 5U-tüp borulu kazıklar için 13. vaka referans alınarak, boru merkezi-kazık merkezi aralıklarının sırasıyla 10 cm ve 20 cm olarak alındığı 14. ve 15. vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. 3U-tüp borulu kazıklar için ise 11. analiz referans alınarak yine boru merkezi-kazık merkezi aralıklarının sırasıyla 10 cm ve 20 cm olduğu 16. ve 17. vaka analizleri yapılmıştır. Bütün analizlerde kullanılan değişken parametreler Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.



**Şekil 3.3:** 11. vaka analizinde kullanılan kazık kesiti.

**Çizelge 3.2:**Parametre incelemelerinde ele alınan değişkenler.

| Analiz No. | Kazık Yarıçapı (cm) | Boru Sayısı | Boru Yarıçapı (cm) | Kazık Merkez Eksenine ile Boru Merkez Eksenine Arası Mesafe (cm) |
|------------|---------------------|-------------|--------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1          | 30                  | 1-U         | 1,60               | 4                                                                |
| 2          | 30                  | 1-U         | 1,60               | 10                                                               |
| 3          | 30                  | 1-U         | 1,60               | 15                                                               |
| 4          | 30                  | 1-U         | 1,60               | 20                                                               |
| 5          | 40                  | 1-U         | 1,60               | 30                                                               |
| 6          | 50                  | 1-U         | 1,60               | 40                                                               |
| 7          | 60                  | 1-U         | 1,60               | 50                                                               |
| 8          | 30                  | 1-U         | 1,25               | 15                                                               |
| 9          | 30                  | 1-U         | 2,00               | 15                                                               |
| 10         | 30                  | 2-U         | 1,60               | 15                                                               |
| 11         | 30                  | 3-U         | 1,60               | 15                                                               |
| 12         | 30                  | 4-U         | 1,60               | 15                                                               |
| 13         | 30                  | 5-U         | 1,60               | 15                                                               |
| 14         | 30                  | 5-U         | 1,60               | 10                                                               |
| 15         | 30                  | 5-U         | 1,60               | 20                                                               |
| 16         | 30                  | 3-U         | 1,60               | 10                                                               |
| 17         | 30                  | 3-U         | 1,60               | 20                                                               |

### 3.3 Farklı Parametrelerin Isı Transferine Etkisi

Bu bölümde gerçekleştirilen parametre analizlerinin sonuçları sunularak farklı parametrelerin ısı transferine etkileri irdelenecektir.

### 3.3.1 Borular arası mesafenin etkisi

Enerji kazıklarında borular donatı kafesine monte edilebilir veyahut basit paspayı benzeri donanımlar ile çeşitli aralıklarla yerleştirilebilir. Şekil 3.4'te PE boruların donatı kafesine monte ettiği bir örnek gösterilmektedir. Farklı aralıklar ile yerleştirilen boruların ısı transferine nasıl bir etkide bulunduğunu öğrenmek amacıyla ilk parametre analizi bu konu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bunun için 30 cm yarıçapında kazık seçilmiş, 16 mm yarıçapındaki boruların merkez eksenini ile kazığın merkez eksenini arasındaki mesafeler sırasıyla 4, 10, 15 ve 20 cm olacak şekilde modelleme gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. vaka olarak adlandırılan analizlerin sonuçları Şekil 3.5'te sunulmuştur.



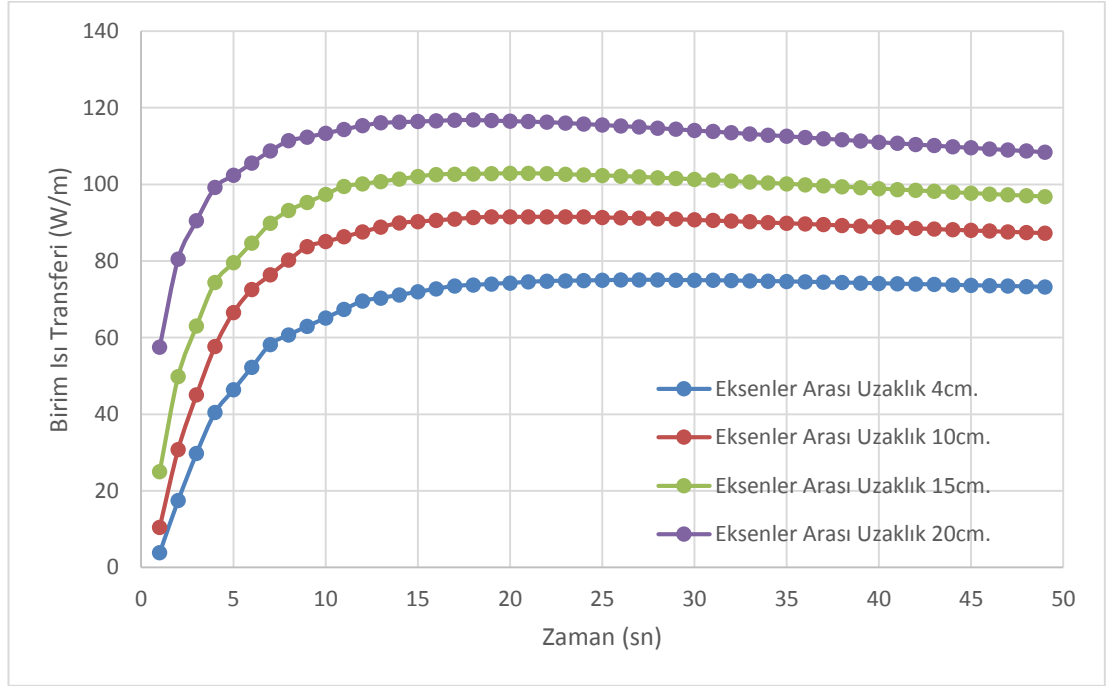
**Şekil 3.4:** PE boru monte edilmiş enerji kazığı donatısı.

Şekil 3.5'deki sonuçlardan da görüleceği üzere ısı değiştirici borular kazık merkezinden uzaklaşıp kazık çeperine doğru yaklaştıkça elde edilen birim ısı transfer değerleri artmaktadır. Boru merkezleri ile kazık merkezlerinin arasındaki mesafe % 100 arttırıldığında ortalama birim ısı transfer değeri % 30 civarında artmaktadır. Bu noktada kazık bütünlüğünün sağlanması amacıyla gerekli paspayının oluşturulabilmesi de göz önünde bulundurularak, ısı değiştirici borular için en ideal alanın kazık donatısının iç çeperi olarak düşünülmektedir.

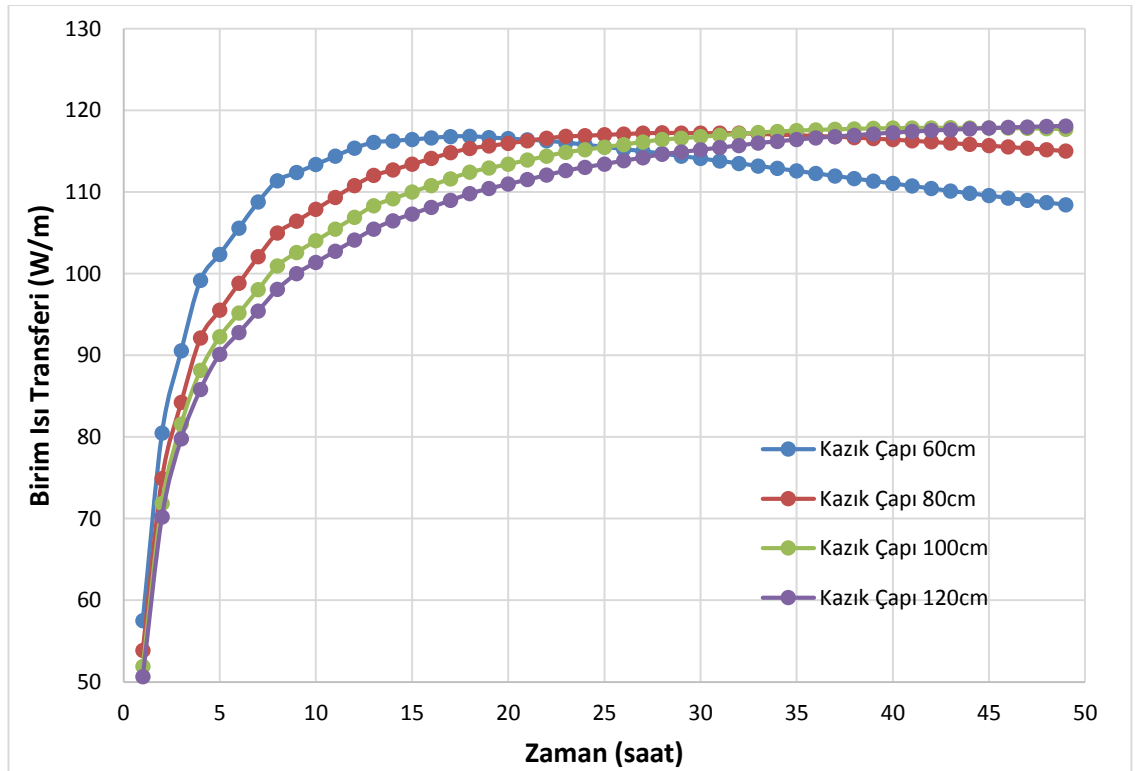
### 3.3.2 Kazık çapının etkisi

Enerji kazıklarında kazık çapının ısı transferine etkisini analiz edebilmek için sırasıyla 4., 5., 6. ve 7. vaka analizlerinde 60 cm, 80 cm, 100 cm ve 120 cm çapındaki kazıklar

karşılaştırılmıştır. Kazıklarda 16 mm ısı değiştirici boruların merkez eksenini kazık çeperine 10 cm mesafede olacak şekilde modellenmiştir. Elde edilen analiz sonucu Şekil 3.6’da özetlenmiştir.



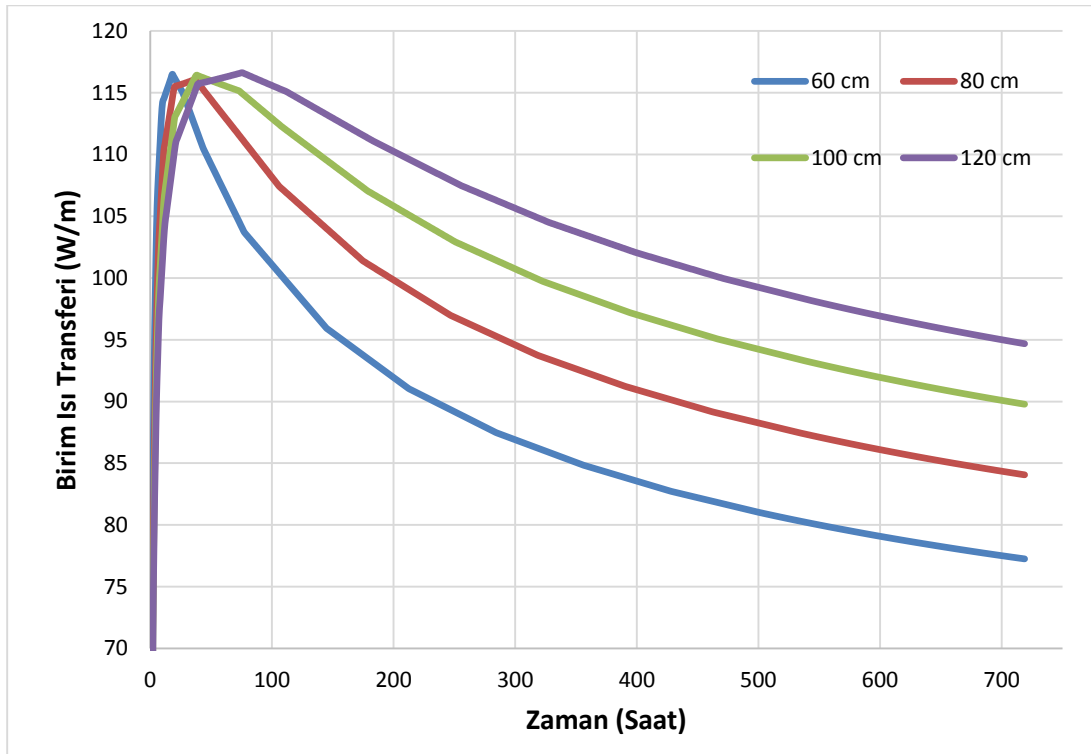
**Şekil 3.5:** Boru merkez eksenini ile kazık merkez eksenini arasındaki uzaklıklarına göre modelleme sonuçları.



**Şekil 3.6:** Kazık çaplarına göre modelleme sonuçları.

Kazık çapları arttıkça kazığın ısıl dengeye gelme süresi artması nedeniyle daha kısa çaplı kazıklar testin ilk sürelerinde daha yüksek birim ısı transfer değerleri sağlamaktadır. Ancak ilerleyen anlarda ise kazık çapının artmasının ısı transferine olumlu etkisi görülmekle birlikte özellikle 100 cm ve 120 cm çapındaki kazıklar birbirlerine çok yakın sonuçlar vermektedir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken bir nokta ise yine 100 cm ve 120 cm çapındaki kazıklardaki sonuçların düşüşe geçmemiş olmasıdır. Buna göre kazıklar henüz tam ısıl dengeye ulaşmamıştır ki buradan 50 saatlik test süresinin büyük çaplı kazıklar için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.

Test süresinin kazık çapının ısıl performansa etkisinin araştırılmasında yeterli olmadığı kanısına varıldıktan sonra aynı analizler 1 aylık süreç için tekrar edilmiştir. 4b, 5b, 6b ve 7b olarak adlandırılan analiz sonuçları Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Buna göre 60 cm’lik kazık çapı % 33 arttırıldığında ortalama birim ısı transfer oranı yaklaşık % 8 artmış. Kazık çapı sırasıyla % 66 ve % 100 arttırıldığında ise ortalama birim ısı transfer oranları yaklaşık % 14 ve % 18 artmıştır.

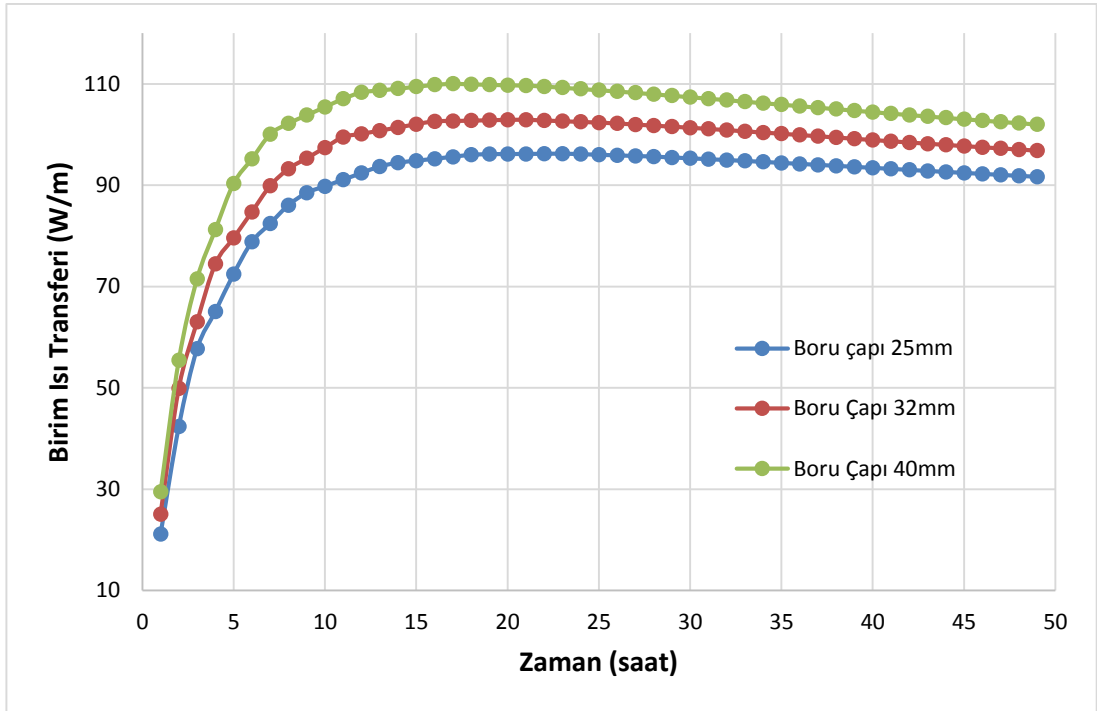


Şekil 3.7: Kazık çaplarına göre modelleme sonuçları (1 aylık analiz).

### 3.3.3 Boru çapının etkisi

Enerji kazıklarında ısı değiştirici boru çapının ısı transferine etkisini analiz edebilmek için piyasada yaygın olarak kullanılan 25 mm, 32 mm ve 40 mm boru çapına sahip

kazıklar analiz edilmiştir. Karşılaştırmaya konu olan kazıklar 30 cm yarıçapında seçilmiş, ısı değiştirici borular kazık çeperinden 15 cm içeriye yerleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçları Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Isı değiştirici boru çapı ile birim ısı transfer değeri aynı yönlü hareket etmekle birlikte kayda değer bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Sayısal olarak ifade edilirse boru çapındaki %60’lık artış, sadece %13’lük bir ısı transfer artışı sağlamaktadır. Bu doğrultuda rahat işçilik uygulaması ve maliyet durumu da göz önünde bulundurulduğunda en ideal ısı değiştirici boru çapının 32 mm olduğu düşünülmektedir.

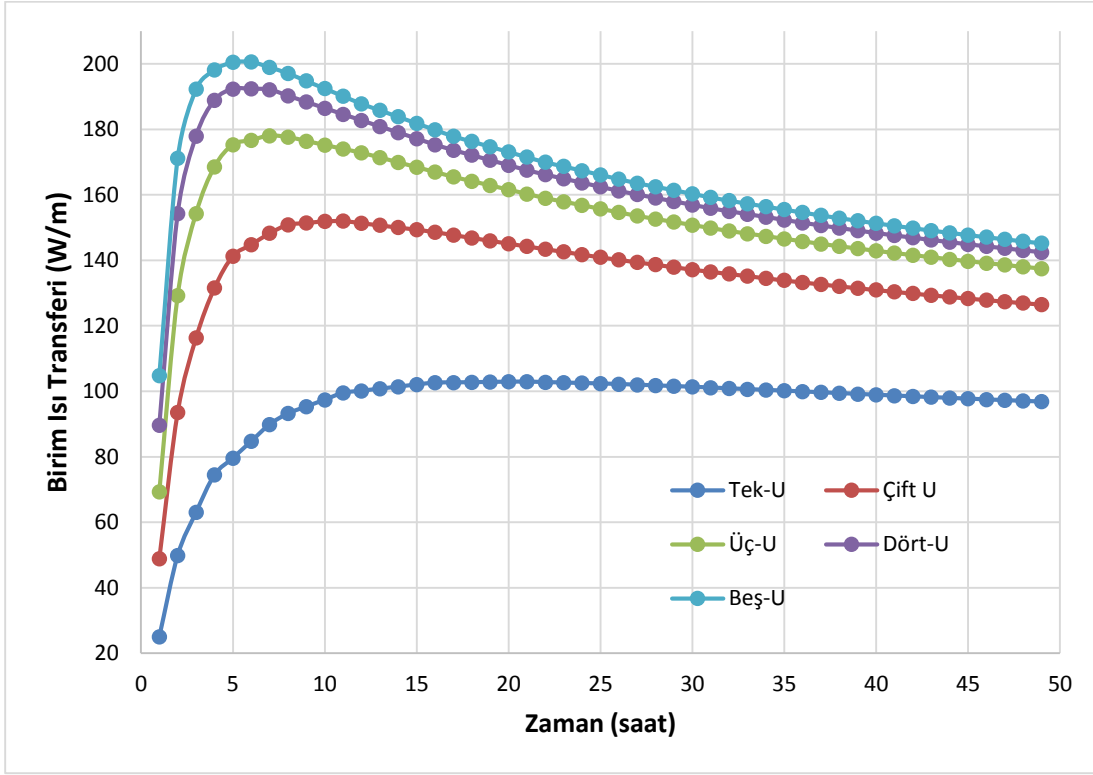


Şekil 3.8: Boru çaplarına göre modelleme sonuçları.

### 3.3.4 Isı değiştirici boru sayısı etkisi

Enerji kazıklarındaki ısı değiştirici boru (U-tüp) sayısının artması ile birim ısı transfer miktarının artması tahmin edilebilir bir durum olmakla birlikte literatürdeki çalışmalarla da kanıtlanmış bir durumdur. Sayısal bir veri elde edebilmek amacıyla bu çalışmada da bu konuda bir karşılaştırma yapılmıştır. 3, 10, 11, 12 ve 13 numaralı vaka analizleri ile sırasıyla 16 mm yarıçapına sahip tek U-tüp, 2U-tüp, 3U-tüp, 4U-tüp ve 5U-tüp içeren 30 cm yarıçapındaki kazıkların birim ısı transfer değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.9’da gösterilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere U-tüp sayısı arttıkça birim ısı transfer değeri de artmış fakat bu artış miktarı her eklenen U-tüp sayısı ile azalmıştır. Birim ısı değiştiricideki artış miktarı tek U-tüpten 2U-tüpe

geçişte % 40, 2U-tüpten 3U-tüpe geçişte % 10, 3U-tüpten 4U-tüpe geçişte ise sadece %5 civarında olmuştur. Bu noktada en ideal kullanımların 2U veya 3U-tüp olduğu görülmektedir.

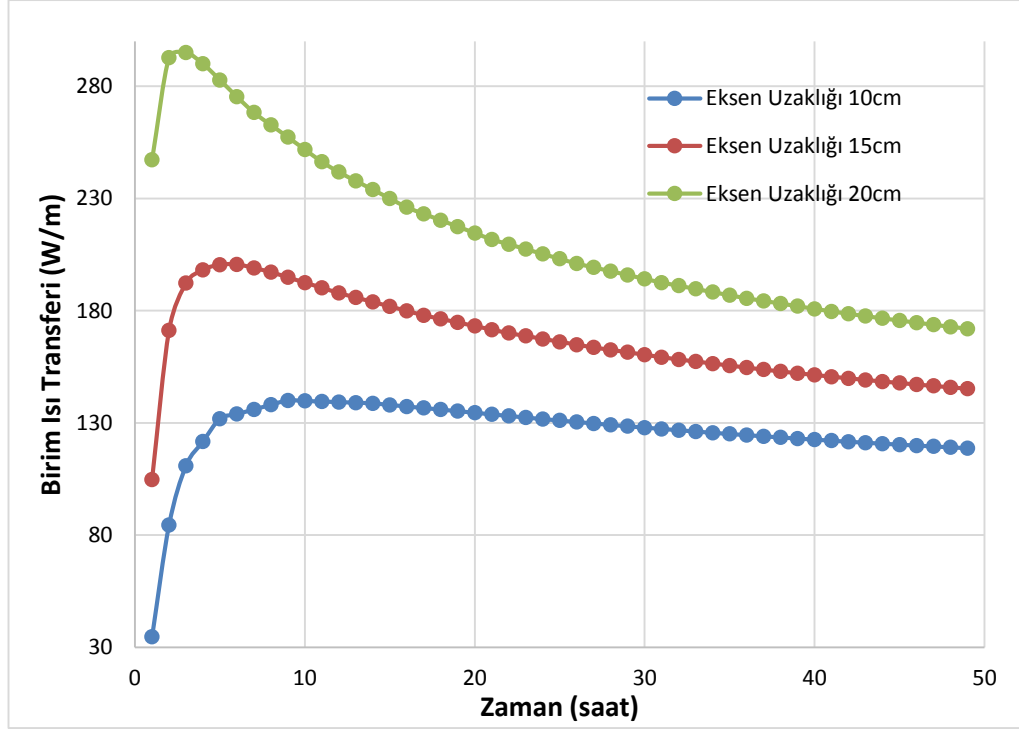


Şekil 3.9: Kazık içerisindeki U-tüp sayısına göre modelleme sonuçları.

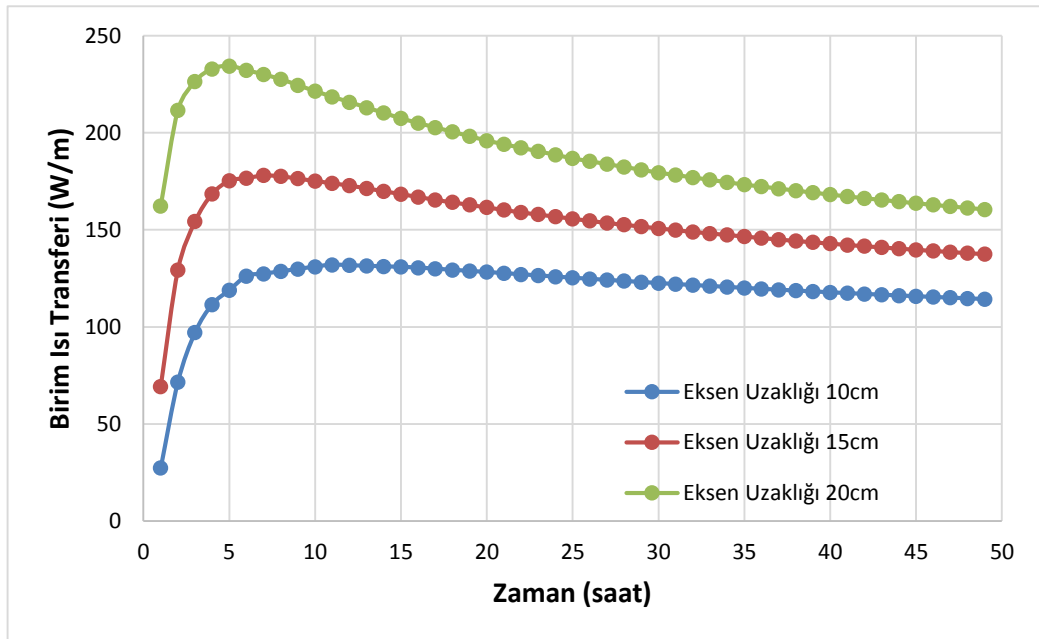
### 3.3.5 Çoklu U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi

İlk olarak tek U-tüp içeren kazıklarda irdelenen borular arası mesafenin çoklu U-tüp içeren kazıklardaki durumu da analiz edilmiştir. İlk olarak 5U-tüp içeren kazıklarda analiz yapılmış, 30 cm yarıçapında kazıkların içerisinde boru merkez ile kazık merkez eksenleri arasındaki mesafenin 10 cm, 15 cm ve 20 cm olduğu durumlar karşılaştırılmıştır (sırasıyla 14, 13 ve 15 numaralı vaka analizleri). Karşılaştırma sonuçları Şekil 3.10'da sunulmuştur. Buna göre ısı değiştirici boruların merkezi ile kazık merkezi arasındaki mesafenin %100 arttırılması durumunda ortalama birim ısı transfer değeri % 62 artmıştır. 3U-tüp içeren kazıklar için de yine aynı şekilde boru merkez ile kazık merkez eksenleri arasındaki mesafenin 10 cm, 15 cm ve 20 cm olduğu durumlar karşılaştırılmıştır (sırasıyla 16, 11 ve 17 numaralı vaka analizleri). Karşılaştırma sonuçları Şekil 3.11'de gösterilmektedir. 3U-tüp borulu kazıklar için de boru merkezi ile kazık merkezi arasındaki mesafenin % 100 arttırılması durumunda ortalama birim ısı transfer değeri % 52 artmıştır. Benzer durumlarda tek U-tüp borulu

kazıklarda % 29 ve 5U-tüp borulu kazıklarda ise % 62 olarak arttığı hatırlanacak olursa borular arası mesafe arttırmanın daha fazla boru içeren kazıklarda daha fazla avantaj sağladığı görülmektedir. Sonuç itibariyle ısı değıştirici boruların olabilecek en geniş açıklıkta yerleştirmenin en avantajlı en seçenekler olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.10: 5U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi.



Şekil 3.11: 3U-tüp içeren kazıklarda borular arası mesafenin etkisi.

Tüm vaka analizleri değişen parametreler ve elde edilen ortalama birim ısı transfer değerleri ile Çizelge 3.3'te özetlenmiştir. Yine tüm analizler için kazık kesitleri ve test sonucu ısı dağılım grafikleri EK-A kısmında sunulmuştur.

**Çizelge 3.3:**Parametre analizlerinde ele alınan değişkenler ve elde edilen ortalama birim ısı transfer değerleri.

| Vaka No. | Kazık Yarıçapı (cm) | Boru Sayısı | Boru Yarıçapı (cm) | Kazık-Boru Merkezleri Mesafesi (cm) | Birim Isı transfer değeri (W/m) |
|----------|---------------------|-------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1        | 30                  | 1-U         | 1,6                | 4                                   | 74                              |
| 2        | 30                  | 1-U         | 1,6                | 10                                  | 87,9                            |
| 3        | 30                  | 1-U         | 1,6                | 15                                  | 100,5                           |
| 4        | 30                  | 1-U         | 1,6                | 20                                  | 113,5                           |
| 5        | 40                  | 1-U         | 1,6                | 30                                  | 116,1                           |
| 6        | 50                  | 1-U         | 1,6                | 40                                  | 117,5                           |
| 7        | 60                  | 1-U         | 1,6                | 50                                  | 117                             |
| 4b       | 30                  | 1-U         | 1,6                | 20                                  | 87,4                            |
| 5b       | 40                  | 1-U         | 1,6                | 30                                  | 94,5                            |
| 6b       | 50                  | 1-U         | 1,6                | 40                                  | 99,7                            |
| 7b       | 60                  | 1-U         | 1,6                | 50                                  | 103,4                           |
| 8        | 30                  | 1-U         | 1,25               | 15                                  | 94,4                            |
| 9        | 30                  | 1-U         | 2                  | 15                                  | 106,7                           |
| 10       | 30                  | 2-U         | 1,6                | 15                                  | 139,4                           |
| 11       | 30                  | 3-U         | 1,6                | 15                                  | 155,3                           |
| 12       | 30                  | 4-U         | 1,6                | 15                                  | 162,7                           |
| 13       | 30                  | 5-U         | 1,6                | 15                                  | 167,4                           |
| 14       | 30                  | 5-U         | 1,6                | 10                                  | 129,5                           |
| 15       | 30                  | 5-U         | 1,6                | 20                                  | 209,8                           |
| 16       | 30                  | 3-U         | 1,6                | 10                                  | 123,6                           |
| 17       | 30                  | 3-U         | 1,6                | 20                                  | 188                             |

### 3.4 Farklı Enerji Kazık Konfigürasyonlarının Isı Transferine Etkisi

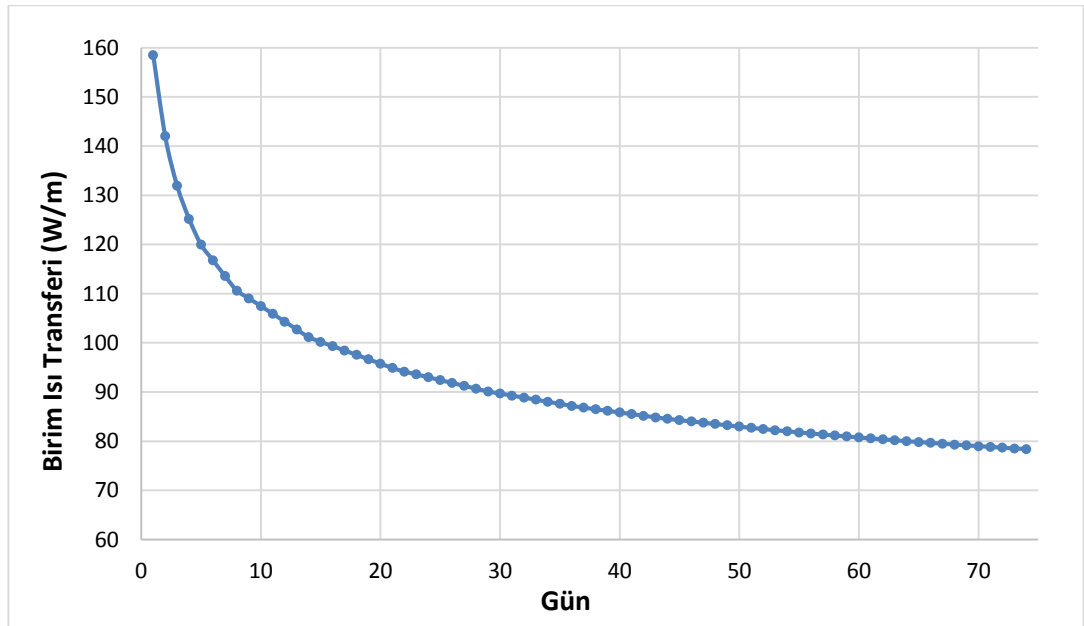
Parametre analizlerinde modellenen bir tek kazığın sadece 50 saat için ısı transferinde bulunması enerji kazıklarının kullanımında gerçeği yansıtan bir durum değildir. Gerçek şartlarda birden fazla kullanılacak olan enerji kazıkları, zemine ısı salarken veya zeminden ısı çekerken birbirine yakın olmaları durumunda ısısal olarak etkileşime girmeleri kaçınılmazdır. Ayrıca yine parametre analizinden farklı olarak enerji kazıklarının uzun süreli kullanımı sonucunda ısı taşıyıcı sıvı ile zemin arasındaki

sıcaklık farkı azalacaktır. Belirtilen bu durumlar neticesinde enerji kazıklarının ısı performansında düşüşler meydana gelecektir.

Bahsedilen performans kaybını belirleyebilmek için birden fazla enerji kazığı kullanımında farklı kazık yerleşimi ve kazık aralıklarının ısı performansına etkisi de sayısal modelleme yöntemi ile incelenmiştir. Bunun için iki, üç ve dokuz adet kazığın birlikte kullanımı modellenmiştir. Analizler için parametre analizinde performans-maliyet açısından en verimli seçeneklerden biri olduğu görülen 11. analizdeki kazık kesiti referans alınarak işlem yapılmıştır. Ayrıca analizler VDI 4640 standardında belirtilen ısı kuyuların analizinde referans alınması gereken süre olarak verilen 1800 saatlik devamlı çalışma şartlarına göre yapılmıştır.

#### 3.4.1 Kazık kullanım süresinin ısı transferine etkisi

Parametre analizlerinde kazıklar önceden belirlenmiş ısı tepki testi süresince analiz edilmiştir. Fakat normal şartlarda daha enerji kazığının daha fazla süre çalışması durumunda ısı taşıyıcı sıvı ile zemin sıcaklığı giderek birbirine yaklaşacak ve enerji kazıklarının birim ısı transferi değeri düşecektir. Oluşacak performans kaybı hakkında fikir sahibi olabilmek için parametre analizlerinde 11. analiz olarak adlandırılan analizdeki kesit sırasıyla 1 hafta, 1 ay ve 2,5 ay (1800 saat) sürelik devamlı çalışma şartlarına göre analiz edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen birim ısı transfer grafiği Şekil 3.12’de sunulmuştur.

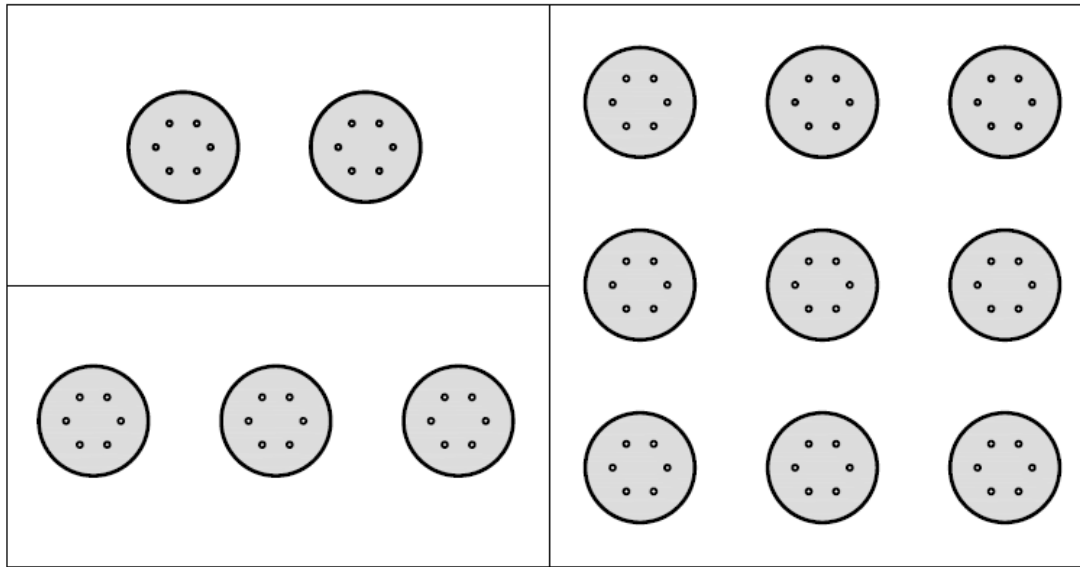


Şekil 3.12: 1800 saatlik kesintisiz çalışma için birim ısı transfer değerleri.

Parametre analizinde 50 saatlik teste tabi tutulan kesitin ortalama birim ısı transfer değeri 137,47 W/m olarak elde edilmişti. 1 haftalık analiz sonucunda ise yaklaşık % 6'lık performans kaybı ile ortalama birim ısı transfer değeri 129,69 W/m olmuştur. 1 aylık ve 2,5 aylık analiz sonunda için de sırasıyla yaklaşık %23 ve %33'lük performans kayıpları ile 105,27 W/m ve 91,92 W/m olmuştur.

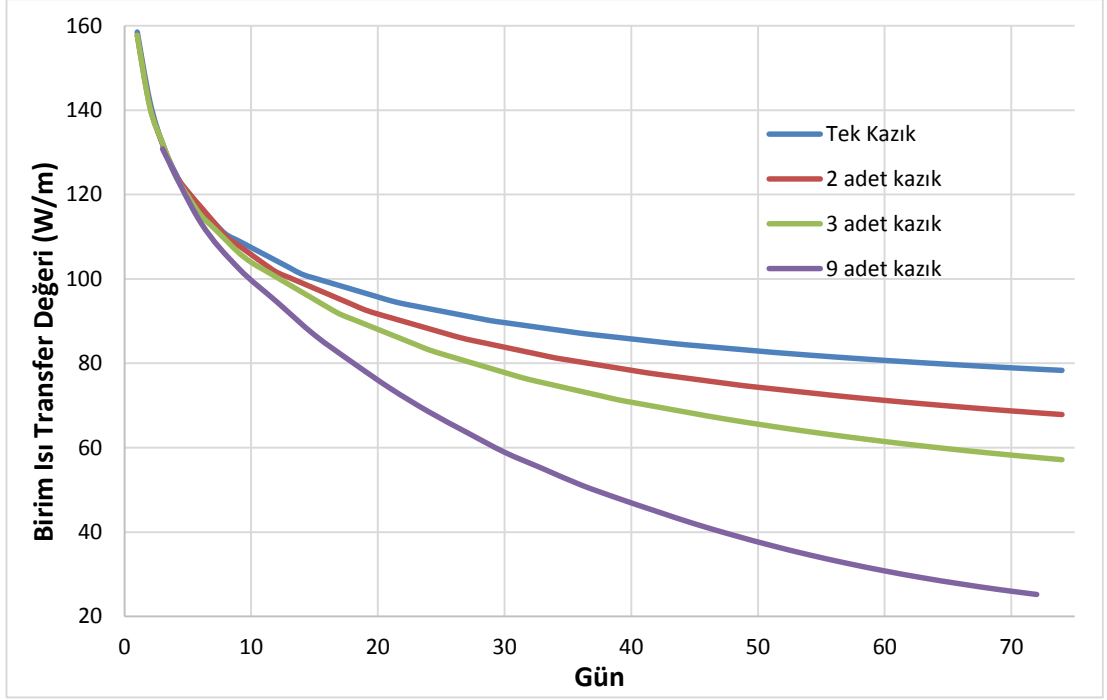
### 3.4.2 Kazık sayısının ısı transferine etkisi

Önceki bölümde de açıklandığı gibi birden fazla kazığın birbirine yakın durumda çalışması sonucunda kazıklar birbiri ile ısı etkileşime girecektir. Bu etkileşimi ve nihayetindeki ısı performans kaybını belirleyebilmek için farklı sayılardaki kazıklar 3'er metre aralıklarla yerleştirilerek analiz edilmiştir. Analiz edilen kazık yerleşim planları Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Simülasyonların sonucunda elde edilen birim ısı transfer grafikleri ise Şekil 3.14'te sunulmuştur.



**Şekil 3.13:** Analizlerde kullanılan enerji kazığı dizilimleri.

Burada öncelikle belirtilmesi gereken husus 9 adet kazığın kullanımı durumunda, sahip olunan bilgisayar donanımlarının 1 günlük analiz adımları ile işlem konusunda yetersiz kalması sonucunda 3 günlük analiz adımları ile işlem gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma grafiğinde 9 adet kazığın sonuçlarının aşağıdan başlamasının sebebi budur. Performans karşılaştırmasında bu durum göz önünde bulundurularak, diğer analizler için de 3 gün itibari ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



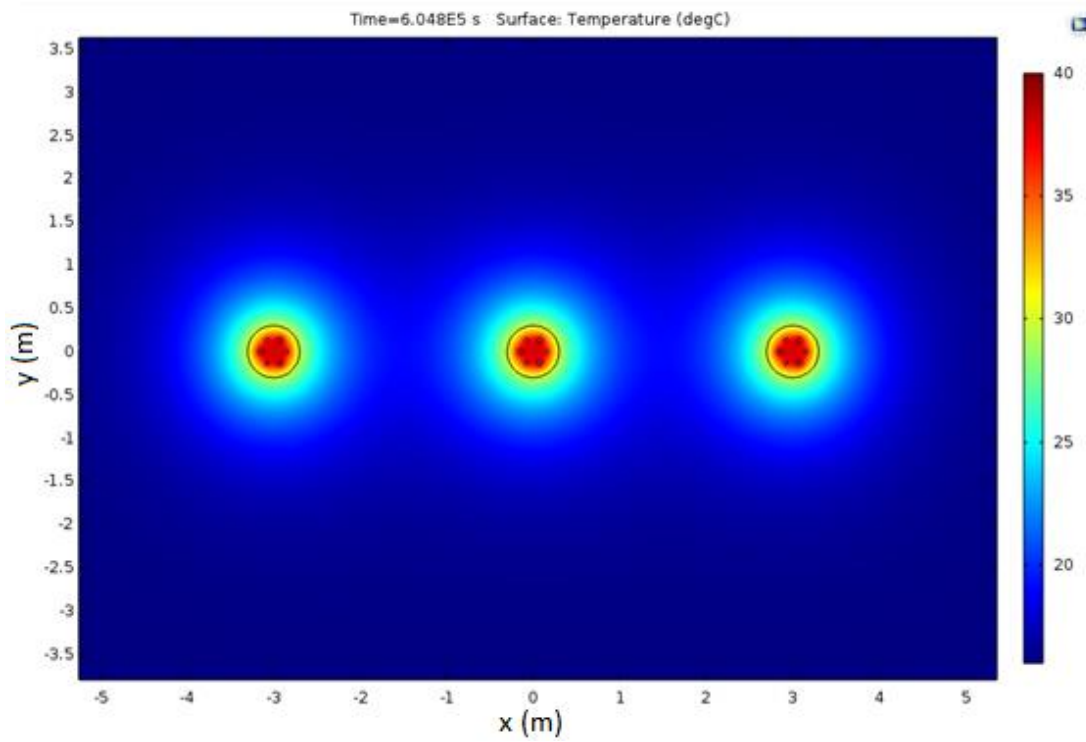
**Şekil 3.14:** Farklı sayıda enerji kazıkları kullanımı durumunda birim ısı transfer değerleri.

Şekilden de anlaşılabacağı üzere her ilave kazık sonrasında tek bir adet kazığın performansında düşme meydana gelmektedir. Özellikle 9 adet kazıkta çok ciddi bir düşüşler gözlemlenmiştir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse tekli kazığa göre, çift kazık kullanımında % 7, üç adet kazık kullanımında yaklaşık % 14 ve 9 adet kazık kullanımında ise yaklaşık % 36'lık bir performans kaybı meydana gelmektedir. Belirtilmesi gerekir ki, iki adet kazığın analizinde kazık performansları birbirine eşit olurken, 3 ve 9 adet kazık için sunulan sonuçlar ortada konumlandırılan kritik kazığın sonuçlarıdır.

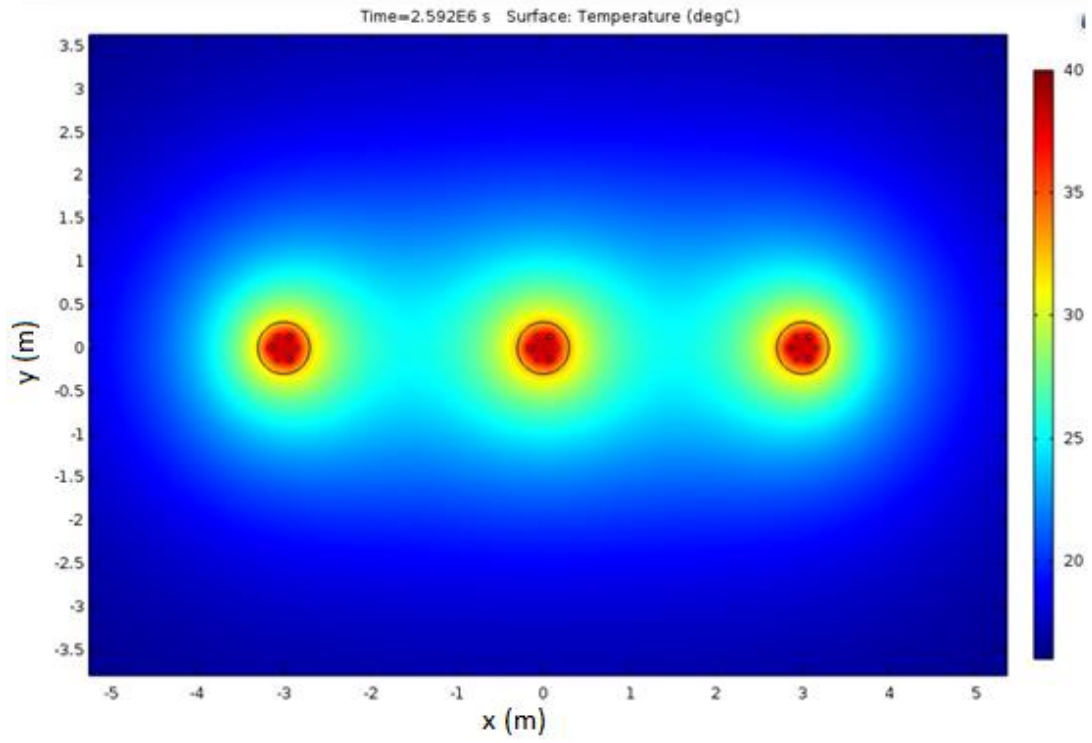
### 3.4.3 Kazık aralıklarının ısı transferine etkisi

Enerji kazıklarının etrafındaki sıcaklık dağılımını, dolayısıyla da kazıkların ısı performansını etkileyen diğer bir önemli parametre de imal edilen enerji kazıklarının arasındaki mesafedir. Kazıkların birbirine yakın bir şekilde çalışması sonucunda kazıklar birbirleri ile ısı etkileşime girecektir. Bu durum zemin sıcaklığının daha hızlı değişmesine ve enerji kazıklarının ısı performansının düşmesi manasına gelmektedir. Kazık aralıkları için uygun değeri belirleyebilmek adına sırasıyla 3 m, 6 m ve 9 m aralıklarla yerleştirilmiş 3 adet kazığın uzun süreli işletim analizleri gerçekleştirilmiştir.

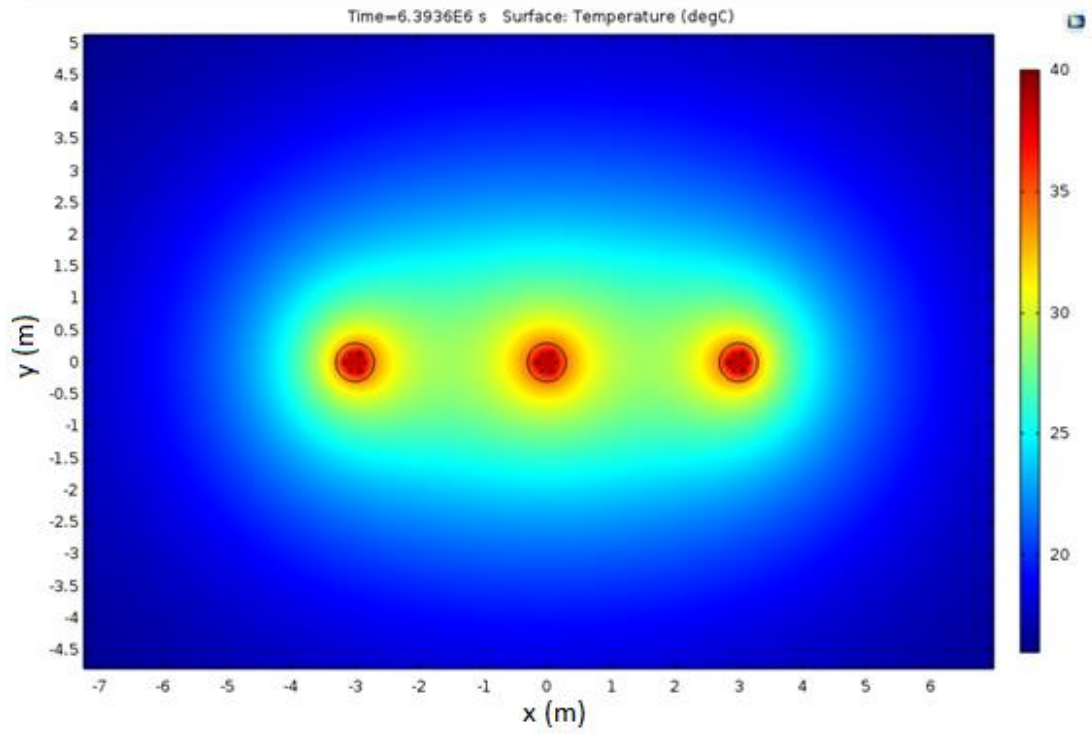
3 m aralıklarla yerleştirilmiş kazıkların 1 haftalık, 1 aylık ve 2,5 aylık işletim sonundaki sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Şekillerden görüleceği üzere kazıkların birlikte çalışması durumunda bir hafta sonunda kazıklar ısıl açıdan etkileşime girmiş ve ilerleyen zaman ile bu etkileşim giderek artmıştır. Kazıkların 6 m aralıklarla yerleştirilmesi durumunda ise etkileşim 35. gün itibariyle gerçekleşmeye başlamıştır. Kazıkların 9m aralıklarla yerleştirilmesi durumunda ise 2,5 ay sonunda dahi bir etkileşim meydana gelmemiştir. 6 m ve 9 m aralıklarla yerleştirilen kazıkların analizler sonucundaki sıcaklık dağılım grafikleri EK-B’de sunulmuştur.



**Şekil 3.15:** 3 m aralıklı kazıklar için 1 hafta devamlı işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.



**Şekil 3.16:** 3 m aralıklı kazıklar için 1 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.



**Şekil 3.17:** 3 m aralıklı kazıklar için 2.5 ay (1800 saat) kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.



#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kazık çapı, ısı değiştirici boru sayısı, çapı ve dizilimi ile kazık çalışma süresi, kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin enerji kazıklarının ısıl performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler için COMSOL Multiphysics paket programı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan 2 boyutlu modellerde zemin ve ısı taşıyıcı sıvının ısıl özellikleri ile sınır şartları değerleri İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsünde gerçekleştirilen enerji kuyusu saha deneylerinden alınmıştır. Kazık betonu için ısıl özellikler ise literatürden seçilmiştir.

Sayısal modelleme ile ilk olarak ısı değiştirici boruların yerleşiminin ısıl performansa etkisi incelenmiştir. Isı değiştirici boruların merkezi ile kazık merkezi arasındaki mesafeyi referans alan bu analizde, belirtilen mesafe arttıkça birim ısı transfer değerleri de artmıştır. Bu noktada ısı değiştirici boruların mümkün olan en açık noktaya yani kazık donatısının iç kısmına monte edilmesi gerekmektedir. Bu tezde incelenmeyen sarmal ısı değiştirici boru tipinin kullanılması durumunda donatı dışına da yerleştirilip yerleştirilemeyeceği, bu durumun kazık bütünlüğüne bir zarar verip vermeyeceği araştırılması önerilen noktalardan biridir.

İncelenen ikinci parametre kazık çapı olmuştur. 60 cm, 80 cm, 100 cm ve 120 cm çapındaki kazıklar ile gerçekleştirilen analizlerde sonuçlar birbirine yakın çıkmakla birlikte, kazık çapı ile birim ısı transferinin değerinin aynı yönlü hareket ettiği görülmüştür. 50 saatlik analiz sonuçlarının yeterli görülmemesi üzerine 1 aylık olarak yenilenen analiz sonuçlarına göre kazık çapının 60 cm'den 120 cm'ye çıkartılması durumunda sadece % 18'lik bir ortalama birim ısı transferi artış meydana gelmiştir. Kazık imalat maliyeti de göz önünde bulundurulduğunda kazık çapının statik projeye göre boyutlandırılan kazığın, ısı transfer performansı için arttırılmaması önerilmektedir.

Kazık çapı gibi ısı değiştirici boru çapları da kazıkların ısıl performansına kayda değer bir etki yapmamaktadır. 25 mm, 32 mm ve 40 mm çapındaki boruların karşılaştırılmasında boru çapı ile birim ısı transfer değeri de artmaktadır. Isı değiştirici boru çapındaki % 60'lık artış, ortalama birim ısı transfer değerinde %13'lük bir kazanç

sağlamaktadır. Bu doğrultuda en ideal ısı değiştirici boru çaplarının rahat işçilik uygulaması ve maliyet durumu da göz önünde bulundurulduğunda 32 mm veyahut çap artışı ile pompa gücünün azalacağı düşünüldüğünde de 40 mm olduğu düşünülmektedir.

Kullanılan ısı değiştirici boru sayısının enerji kazıklarının ısıl performansını incelemek amacıyla sırasıyla tek U, çift-U, 3U, 4U ve 5U tüp içeren kazıkların birim ısı transfer değerleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. U-tüp döngü sayısı arttıkça birim ısı transfer değeri de artmış fakat bu artış miktarı her eklenen U-tüp sayısı ile azalmıştır. Birim ısı değiştiricideki artış miktarı tek U-tüpten 2U-tüpe geçişte % 40, 2U-tüpten 3U-tüpe geçişte % 10, 3U-tüpten 4U-tüpe geçişte ise sadece %5 civarında olmuştur. Bu noktada en ideal kullanımların 2U veya 3U-tüp olduğu görülmekte, kesin kararın projeye göre yapılacak maliyet-performans analizlerine göre verilmesinin uygun olduğu düşünülmektedir. Ancak esas maliyetin kazık imalatı olduğu düşünülürse yapılacak kazık sayısının ısıl yüklerden ziyade statik yüklere göre belirleneceği, bu durumda da ufak maliyetler ile boru sayısı arttırmanın çok da dezavantajlı olmayacağı durumlarla karşılaşılabileceği öngörülmektedir.

Isı değiştirici boruların kazık çeperine yakın yerleştirilmesinin daha iyi ısıl performans sağladığı tek boru içeren kazık analizinde görülmüştü. Birim ısı transfer oranının değişimini takip edebilmek için aynı analiz 3U ve 5U tüp içeren kazıklarda tekrar edildi. Buna göre ısı değiştirici boru merkezi ile kazık merkezi arasındaki mesafeler % 100 arttırıldığında, tek U döngü içeren kazığın ortalama birim ısı transfer değeri % 30 artarken, bu artış 3U ve 5U içeren kazıklarda sırasıyla % 52 ve % 62 olarak gerçekleşmiştir. Buna göre parametrelerden performansa en iyi etkiyi yapan durumlar bir araya gelince performans artışının çoğalacağı anlaşılmaktadır.

Enerji kazıklarının kullanım sürelerinin kazık ısıl performansına etkisi araştırıldığında; kazığın 1 hafta kesintisiz kullanımında ortalama ısıl performansının % 6, 1 ay ve 2,5 ay süreyle kesintisiz kullanıldığında ise sırasıyla % 23 ve % 33 oranında düştüğü sonucu elde edilmiştir. Enerji kazığı tasarım aşamasında kazığın imal edileceği bölgenin iklim koşulları göz önünde bulundurularak, kazık çalışma süreleri belirlenmeli ve gerçekleştirilecek ortalama performans kayıpları buna göre belirlenmelidir.

Enerji kazıklarının birlikte çalışması durumunda artan her kazık sayısı tek bir kazığın ısıl performansını düşürmektedir. Bu durum daha fazla kazık ile ısı çekilmesi / atılması

durumunda zemin ile ısı taşıyıcı sıvının sıcaklık farkının azalması sonucu meydana gelmektedir. 3 adet ve 9 adet kazığın bir arada olduğu durumlarda kritik kazık olan merkezdeki kazıklarda tek kazığa göre sırasıyla %14 ve %36'lık performans kayıpları meydana geldiği görülmüştür. Ancak bu husus kazıklar arasındaki mesafe ile birlikte incelenmelidir. Zira diğer bir analiz olan kazıklar arası mesafenin ısı performans etkisi analizinde kazıklar 3 m aralıklarla yerleştirildiğinde 1 hafta sonunda kazıklar ısı etkileşime girerken, 6 m aralıklarla yerleştirilen kazıklarda bu süreç 35 güne çıkmıştır. 9 m aralıklarla yerleştirilen kazıklarda ise 2,5 aylık analiz sonucunda bir ısı etkileşim meydana gelmemiştir. Bu bağlamda 6 m'lik kazık aralığının çok aşırı soğuk veya çok aşırı sıcaklıkların yaşanmadığı birçok bölge için ideal olduğu düşünülmektedir.

Tüm bu verilerin ışığında varılan esas sonuç enerji kazığı tasarımında önceliğin muhakkak kazığın statik performansa verilmesi gerektiğidir. Zira yüksek maliyetli bir imalat grubu olması nedeniyle ufak çaplı enerji kazanım artışları için daha fazla maliyet artışına girilmemelidir. Kazık sisteminin ısı performansı için ise projenin yapılacağı yerde ısıl tepki testi yapılarak zeminin ısı özellikleri belirlenmelidir. Elde edilen verilerin ışığında sistem modellenerek sistemin ısı performansı hakkında fikir sahibi olunmalıdır. Bu şekilde verimsiz veya aşırı tasarımların önüne geçilecektir.

Bu noktada belirtilmesi gereken son husus ise imkânların el vermesi durumunda analizlerin üç boyutlu olarak gerçekleştirilmesi gerekliliğidir. Bu şekilde ısı taşıyıcı sıvının akış özellikleri ve derinlikle sıcaklık değişimi gibi daha farklı özelliklerde modele tanıtılabilir. Ayrıca helisel ısı değiştirici boru gibi farklı boru tipleri de analiz edilebilir ve en verimli sonuca ulaşılabilir.



## KAYNAKLAR

- Abdelaziz, S.L., Olgun, C.G., Martin, J.R.** (2011). Desing and operational consideration of geothermal energy piles. *Geo-Frontiers 2011*, GSP 211, (s.450-459), ASCE.
- Abu-Hamdeh, N. H., Khdair, A. I., Reeder, R.C.,** (2001). A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 1073-1078, Pergamon.
- Aydın, M.** (2015). *Toprak ısı değiştiricilerinde yeni bir ısıl tepki yöntemi ve performansın parametrik incelenmesi*, (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Bezyan, B., Porkhial, S., Mehrizi, A.A.**(2015). 3-D simulation of heat transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration. *Applied Thermal Engineering*, 87, 655-668.
- Brandl, H.** (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*,56(2), 81-122.
- 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.
- Coşman, S.** (2013). *Fore kazıklara entegre edilen ısı pompası uygulaması ve ekonomk analizi*, (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cui, P., Li, X., Man, Y., Zhaohong, F.** (2011). Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils, *Applied Energy*, 88, 4113-4119.
- Di Donna, A., Loria, A.F.R., Laloui, L.,** (2015). Numerical study of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads. *Computers and Geotechnics*, 72, 126-142, Elsevier.
- Franco, A., Moffat, R., Toledo M., Herrera, P.,** (2016). Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles. *Renewable Energy*, 86, 985-992, Elsevier.
- Gashti, E.H.N., Malaska, M., Kujala, K.,** (2014). Evaluation of thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heatin/cooling operations. *Engineering Structures*,75, 363-373, Elsevier.
- Gecesefa, Ö.F.**(2012). *Erzurum yöresindeki jeotermal enerji kaynaklarının seraların ısıtımında kullanımı ve geliştirilen excel programıyla yöre koşullarına uygun sera tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- Gehlin, S.** (2002) *Thermal Response Test, Method Development an Evaluation*, (Doktora Tezi), Lulea University of Technology, İsveç.
- Gültekin, A.** (2014). *Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde kuyular arası uzaklığın performansa etkisinin deneysel ve sayısal incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Hu, P., Zha, J., Lei, F., Zhu, N., Wu, T.** (2014). A composite cylindrical model and its application in analysis of thermal response and performance for energy piles. *Energy and Buildings*, 84, 324-332, Elsevier.
- Incopera, F.P. ve DeWitt, D.P.** (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6.Baskı)*. NewYork, Wiley.
- Keskin, K.** (2012). *Çevre Mühendisliğinde Ar-Ge uygulamalarının araştırılması “Yenilenebilir Enerji Örneği”*. (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Lee, S. R.** (2009). Energy Piles: Piles as heat exchangers [PowerPoint Slides]. Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kaist.
- Loveridge, F., Powrie, W.** (2014). 2D thermal resistance of pile heat exchangers. *Geothermics*, 50, 122-135, Elsevier.
- Minister of Natural Resources Canada.** (2004). *Ground-Source Heat Pump Project Analysis: Philadelphia Enterprise Centre* [PowerPoint slides]. Erişim: 01 Eylül 2015, [http://www.retscreen.net/download.php/hr/130/1/Course\\_gshp.ppt](http://www.retscreen.net/download.php/hr/130/1/Course_gshp.ppt)
- Olcar, D.** (2012). *Bursa Kaynarca – sıcak su bölgesinde jeotermal enerjinin konut tasarımında kullanılabilirliği üzerine bir araştırma*. (Yüksek Lisans Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Olgun, C. G., Martin, J. R., Abdelaziz, S. L.** (2010). Temel mühendisliğinde yenilenebilir enerji uygulamaları. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, Cilt I, (s.57-84). İstanbul.
- Omer, A. M.** (2008). A Ground-source heat pump systems and applications. *A Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12, 344-371.
- Ömür, N.** (2015). *Enerji depolamada kullanılan süperiletken manyetik yatakların sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özudogru, T., Brettmann, T. Olgun, C. G., Martin J. R., Senol, A.** (2012). Thermal Conductivity Testing of Energy piles: Field testing and numerical modeling. *GeoCongress 2012*, 4436-4445.
- Peron, H., Knellwolf, C., Laloui, L.** (2011). A Method for the geotechnical design of heat exchanger piles. *Geo-Frontiers 2011*, GSP 211, (s.470-479). ASCE.
- Tamyerli, U.** (2007). *Jeotermal enerjiden elektrik üretiminin irdelenmesi “Örnek Çalışma: Kütahya – Simav jeotermal sahası”*. (Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Uponor Ground Energy**, *Technical Information*, 05/2012 (2012).

- Url-1** <<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Temiz-Enerji>>, erişim tarihi: 05.04.2016.
- Url-2** <<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal>>, erişim tarihi: 05.04.2016.
- Url-3** <[http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar\\_en\\_hak.html](http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html)>, erişim tarihi: 10.01.2016.
- Url-4** <<http://www.igdas.istanbul/YakitKarsilastirmasi/Index/0?lang=tr&sc=1&ay=3&yil=2016>>, erişim tarihi: 15.04.2016.
- Url-5** <<http://jeotermal.balikesir.edu.tr/jeotermalnedir.php>>, erişim tarihi: 01.03.2016.
- Url-6** <[http://exergia.gr/projectsites/iller\\_bank/files/Costas\\_Karytsas\\_-\\_Turkish/6.%20KIE%20tasarim%20araclari%20Termal%20Tepki%20Testi.ppt](http://exergia.gr/projectsites/iller_bank/files/Costas_Karytsas_-_Turkish/6.%20KIE%20tasarim%20araclari%20Termal%20Tepki%20Testi.ppt)>, erişim tarihi: 12.03.2016.
- VDI 4640** (2000). *Thermal use of the underground* (ICS 27.080).
- Wachtel, A.** (2010). *Energy Today: Geothermal Energy*. New York , NY.: Chelsea Clubhouse.
- Wang, D., Lu, L., Zhang, W., Cui, P.** (2015). Numerical and analytical analysis of groundwater influence on the pile geothermal heat exchangers with cast-in spiral coils, *Applied Energy*,160, 705-714.
- Zarrella, A., Capozza, A., De Carli. M.** (2013a).Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers: A simulation-based comparison. *Applied Energy*,112,358-370.
- Zarrella, A., Carli, M. D., Galgaro, A.** (2013b). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 61, 301-310.

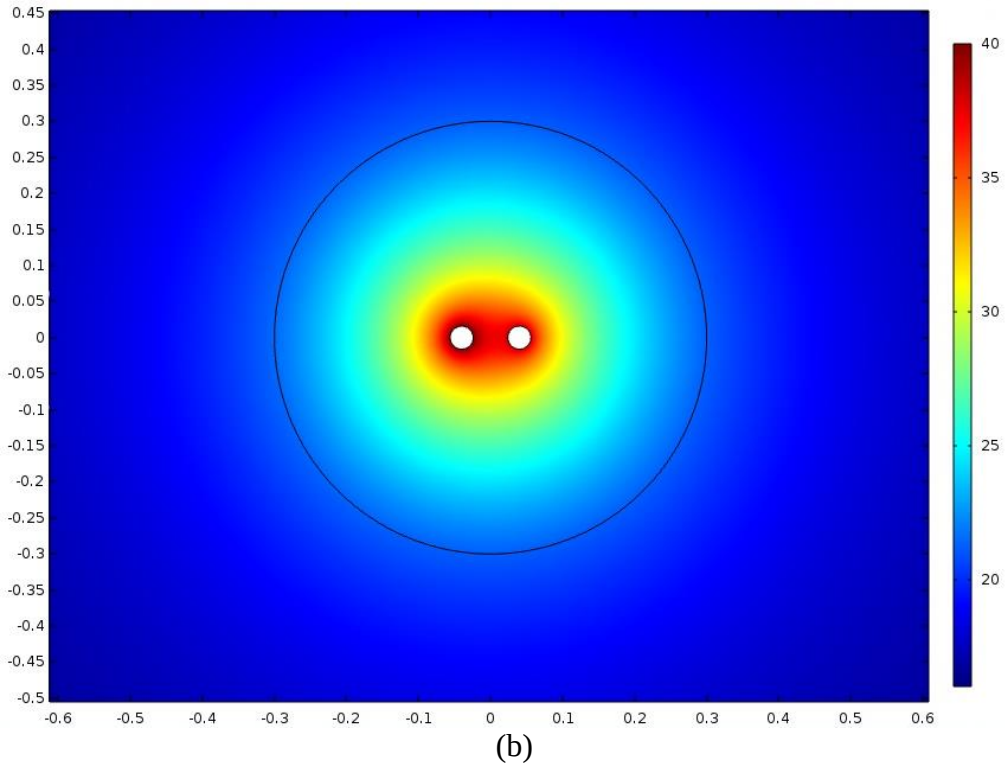
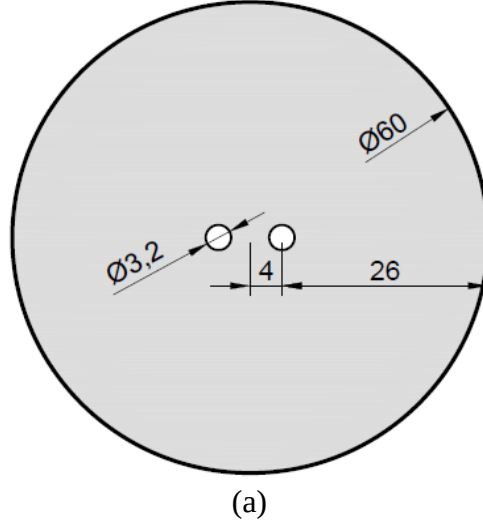


## **EKLER**

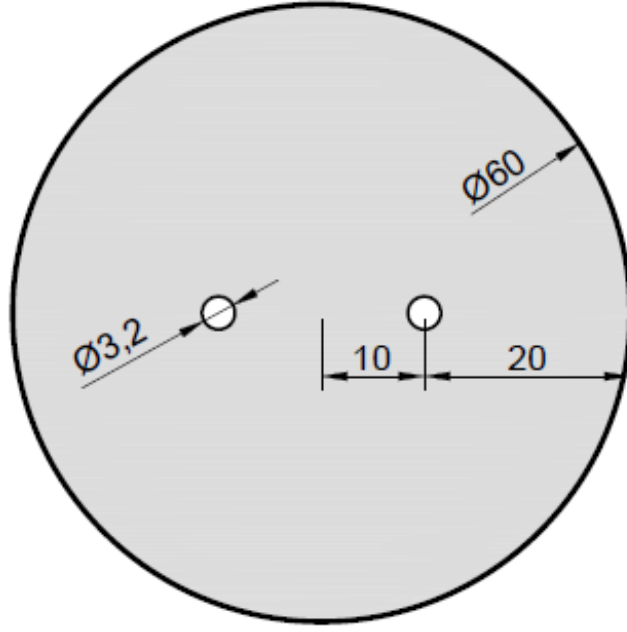
**EK A:** Parametrik İncelemede Gerçekleştirilen 1-17 Numaralı Analizlere Konu Olan Enerji Kazıklarının Kesitleri ve Analiz Sonucundaki Sıcaklık Dağılımları

**EK B:** Kazık Aralıklarına Göre Kazıkların Isıl Etkileşim Grafikleri

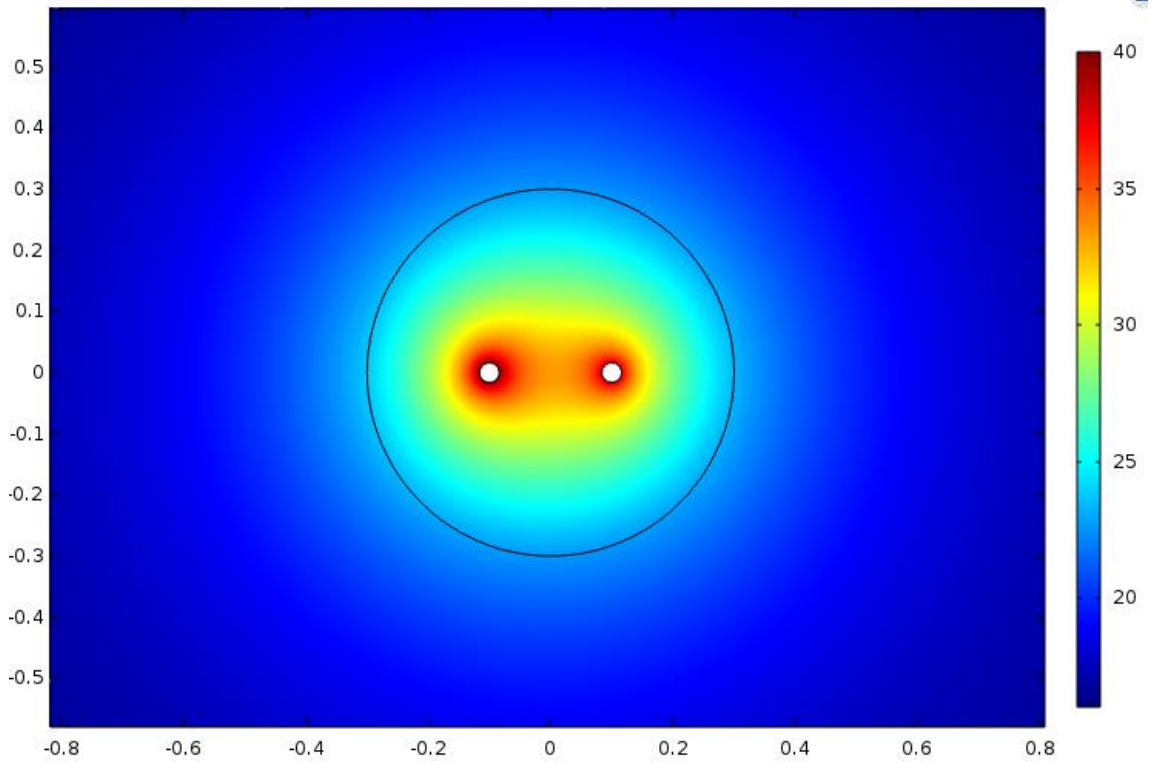
**EK A: PARAMETRİK İNCELEMEDE GERÇEKLEŞTİRİLEN 1-17  
NUMARALI ANALİZLERE KONU OLAN ENERJİ KAZIKLARININ  
KESİTLERİ VE ANALİZ SONUNDAKİ SICAKLIK DAĞILIMLARI**



**Şekil A.1:** 1 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

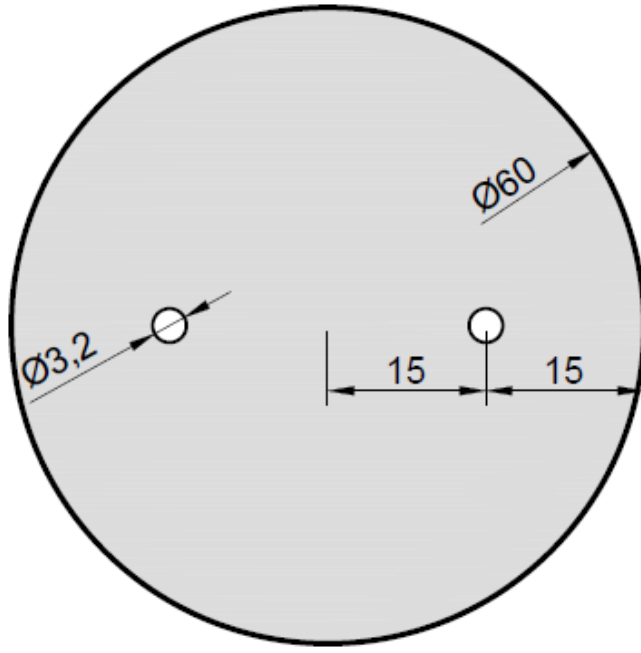


(a)

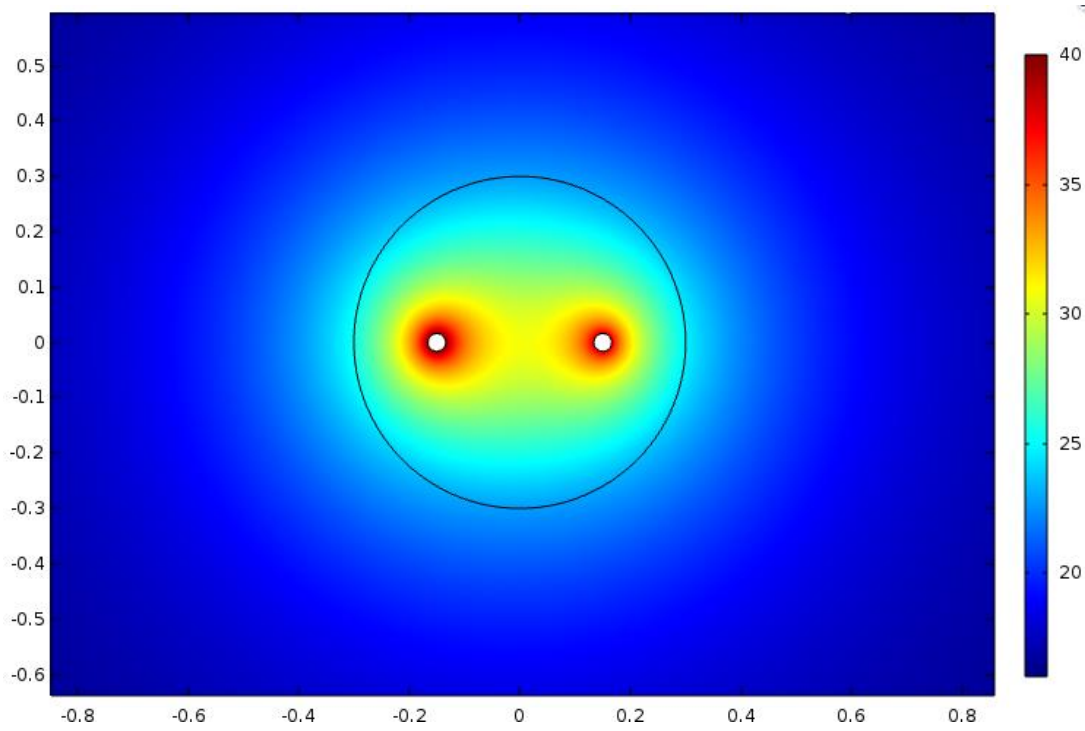


(b)

**Şekil A.2:** 2 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

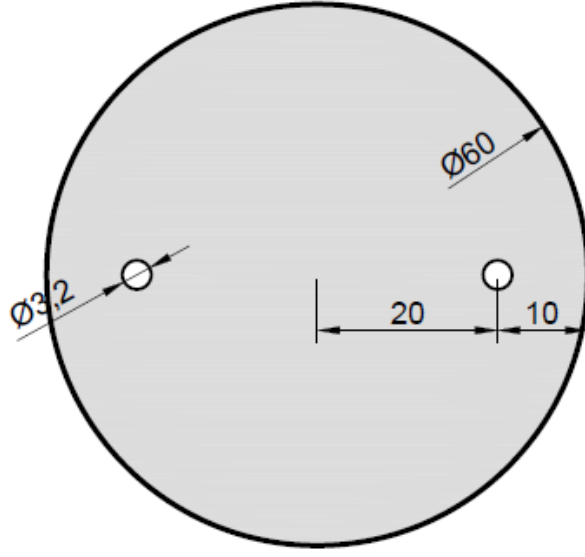


(a)

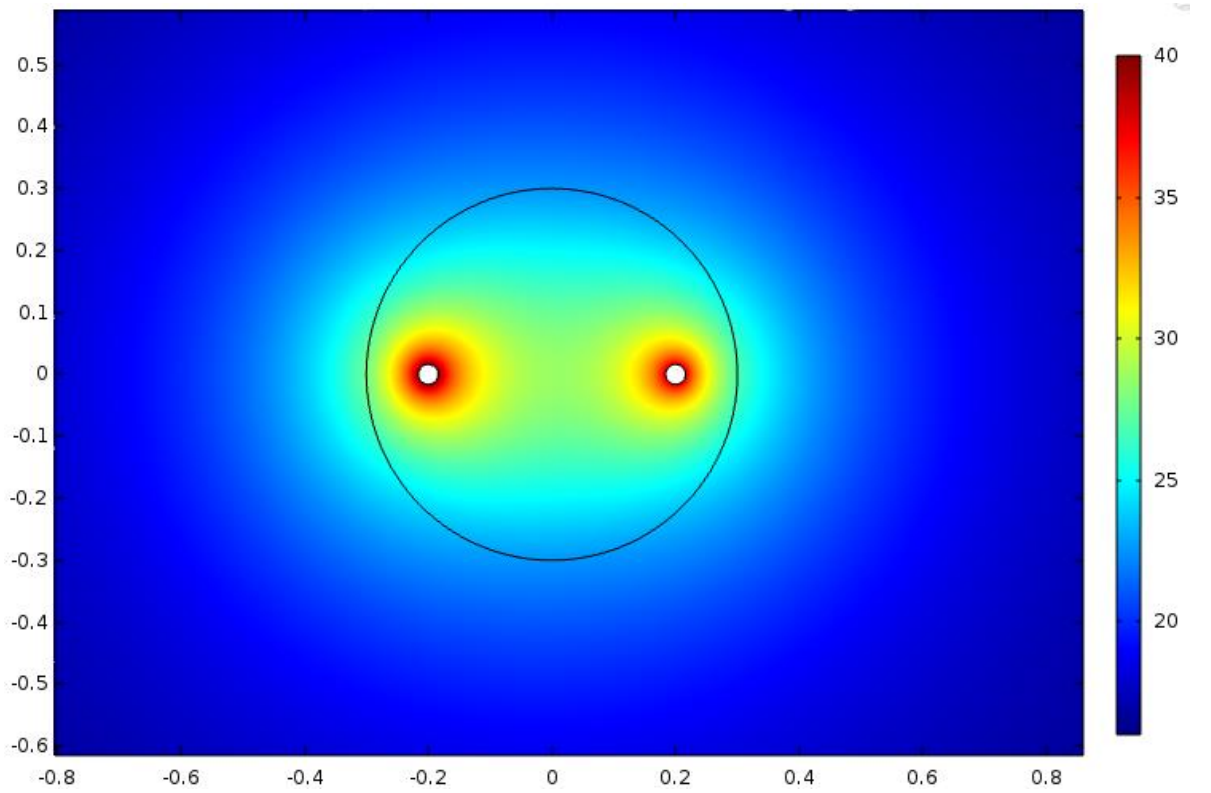


(b)

**Şekil A.3:** 3 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

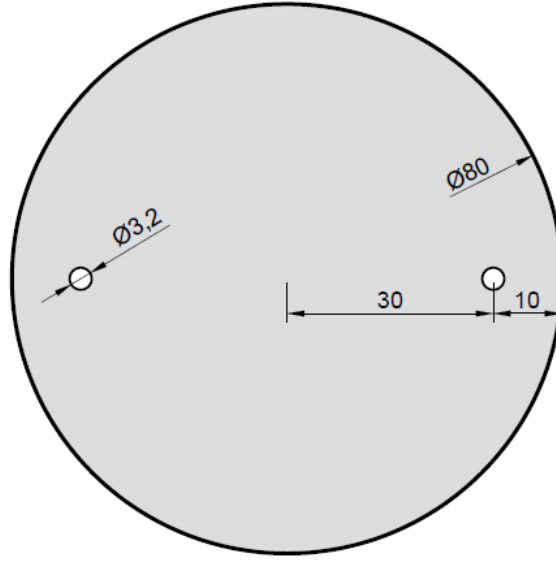


(a)

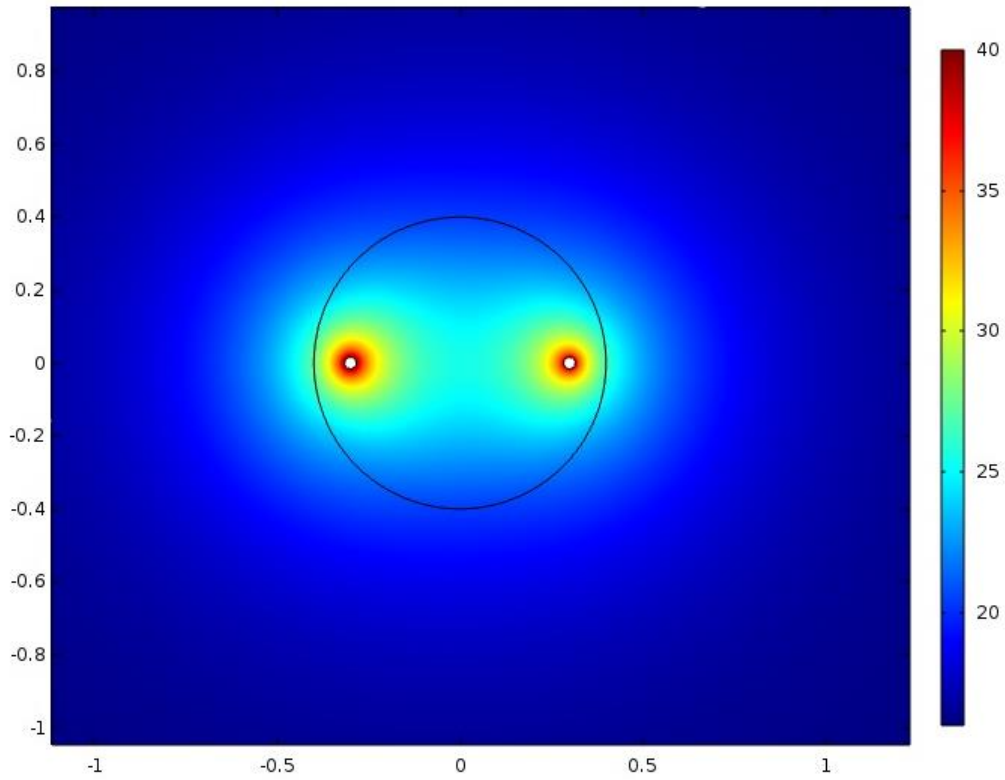


(b)

**Şekil A.4:** 4 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

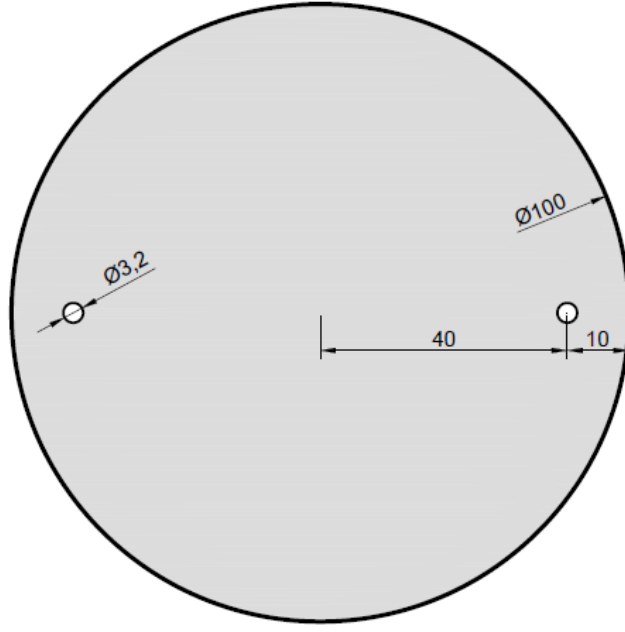


(a)

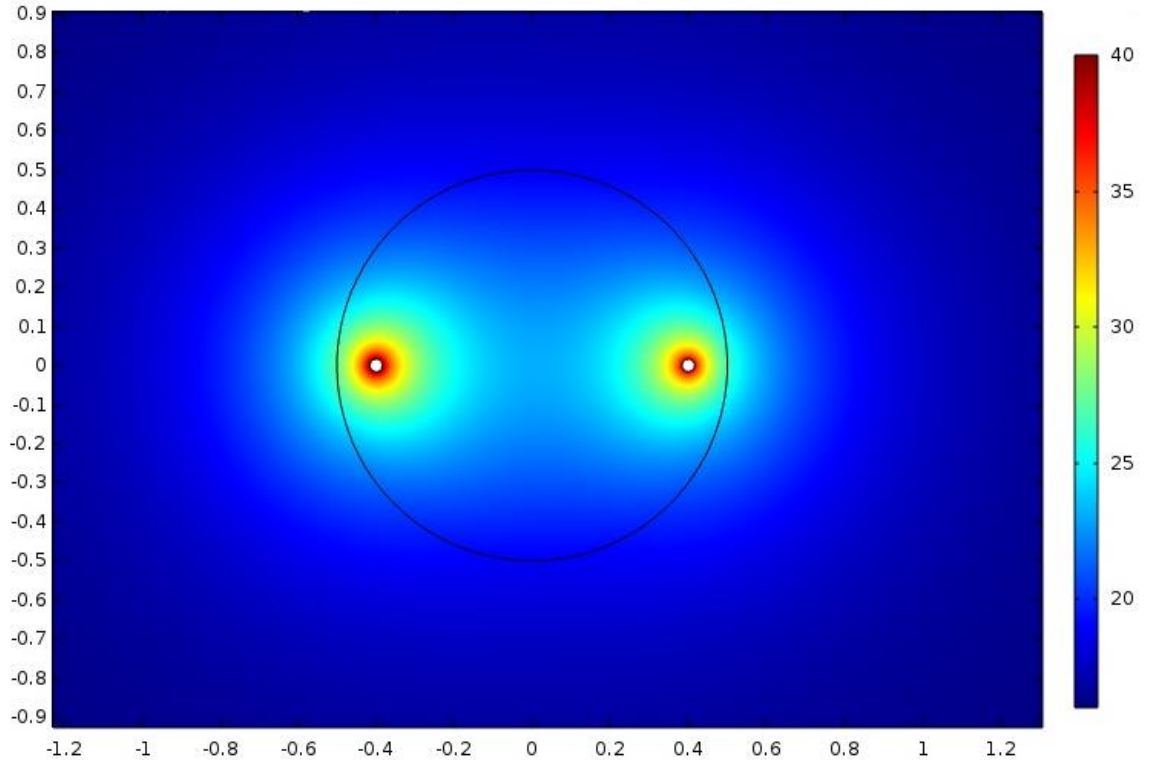


(b)

**Şekil A.5:** 5 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

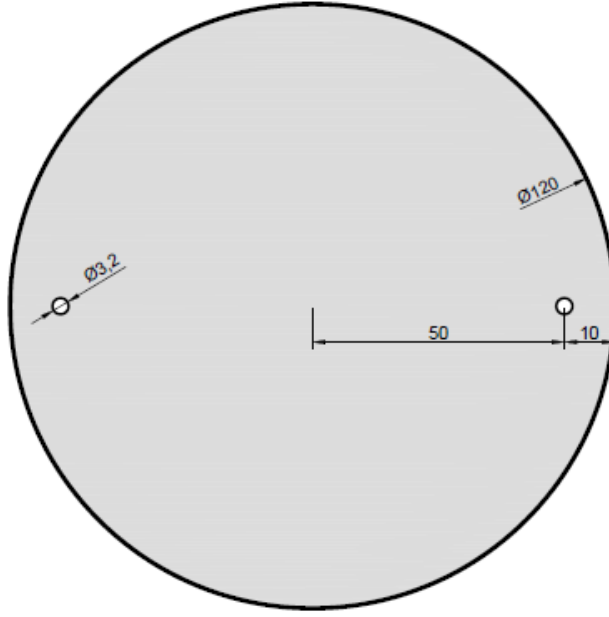


(a)

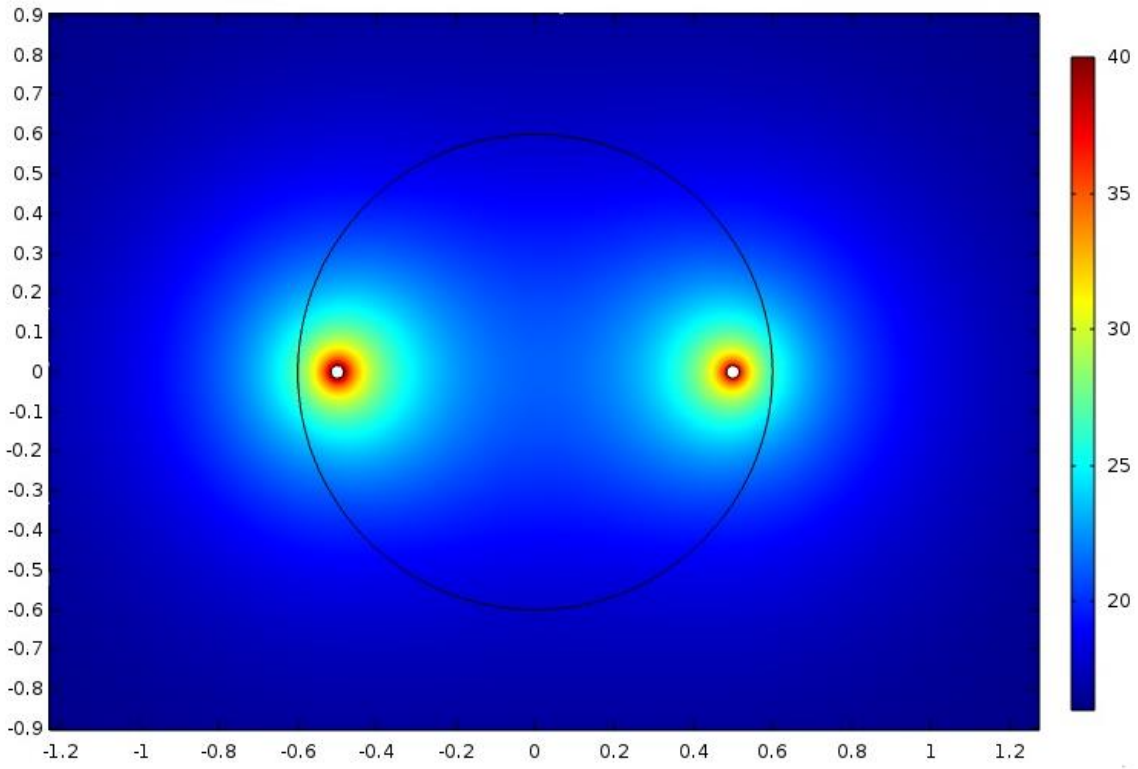


(b)

**Şekil A.6:** 6 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

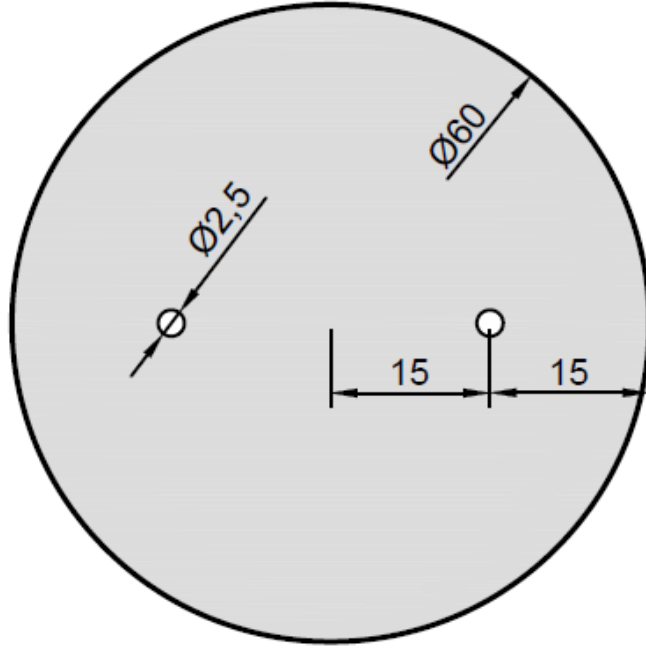


(a)

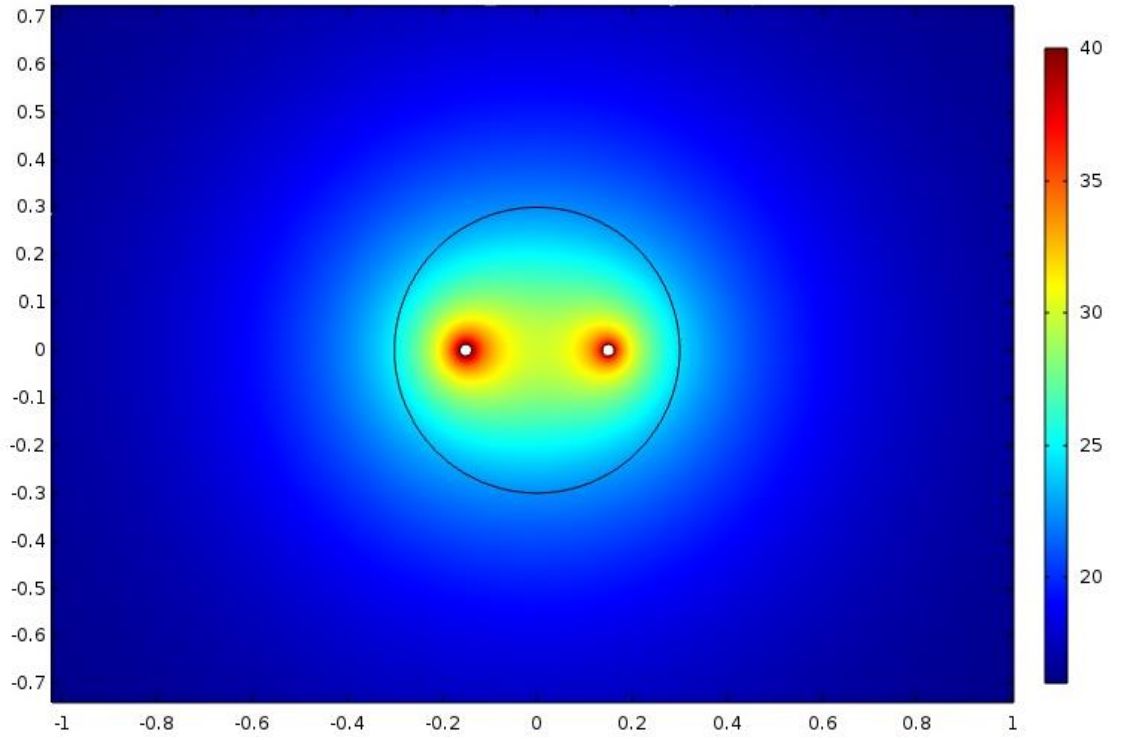


(b)

**Şekil A.7:** 7 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

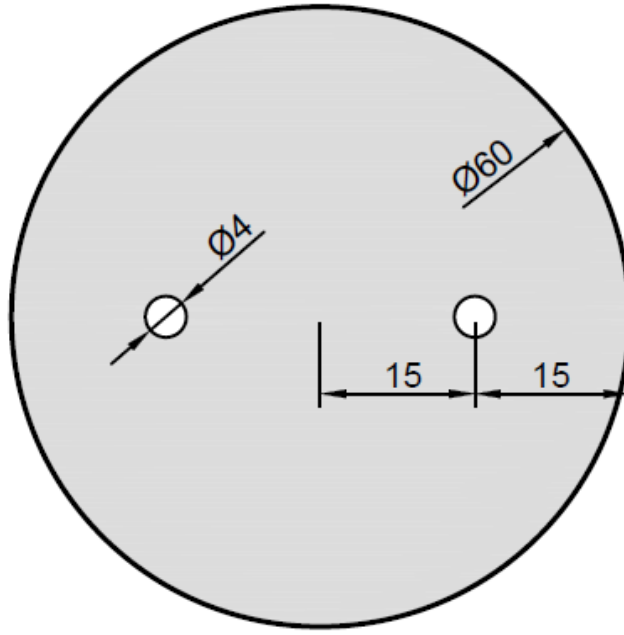


(a)

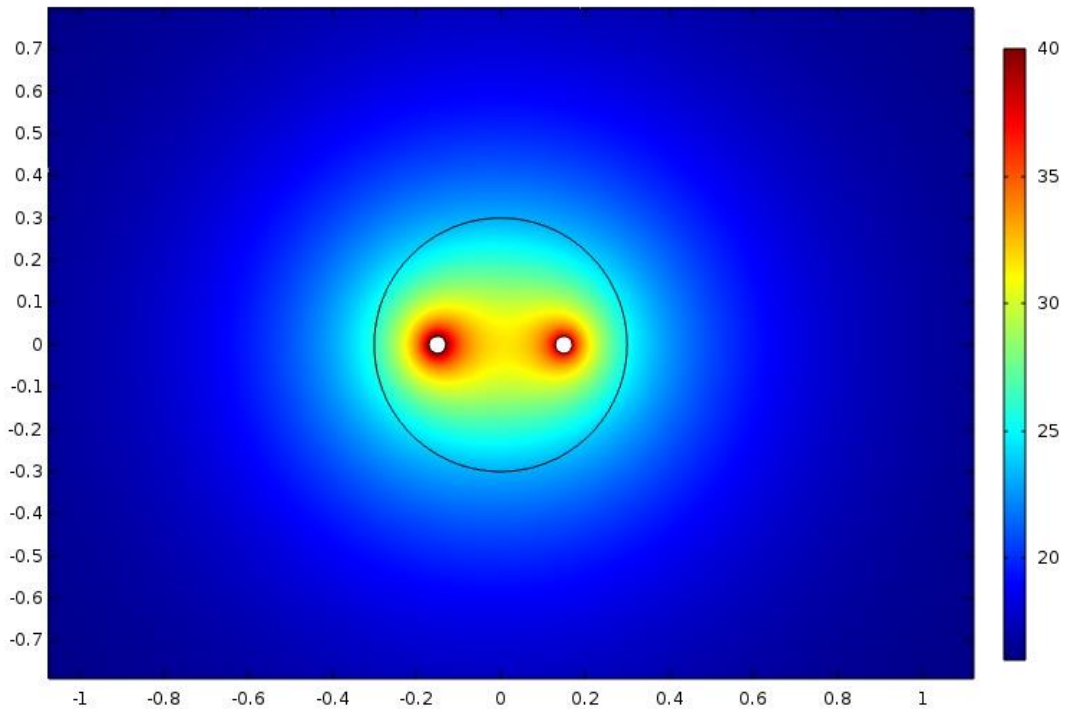


(b)

**Şekil A.8:** 8 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

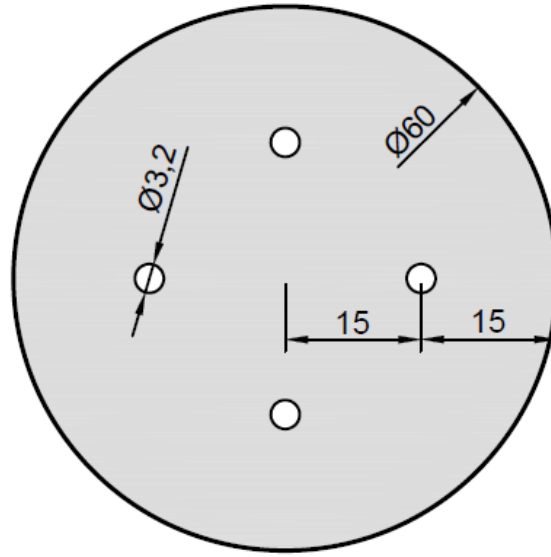


(a)

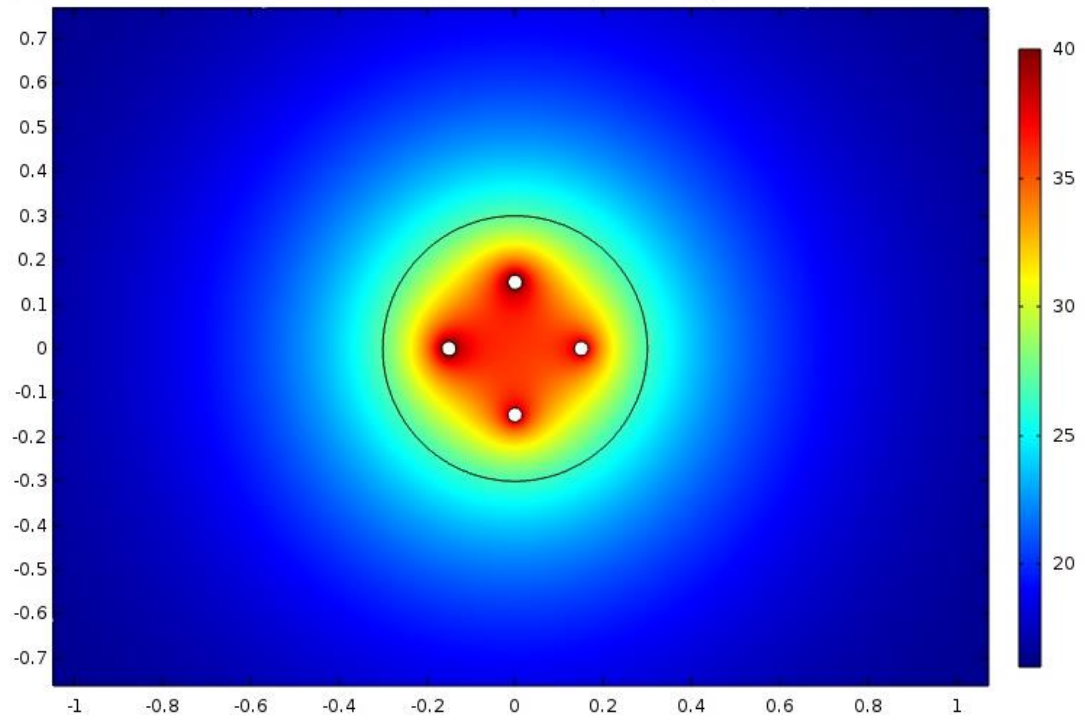


(b)

**Şekil A.9:** 9 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

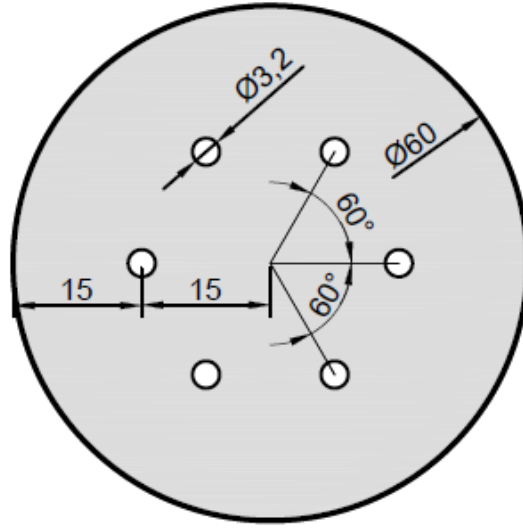


(a)

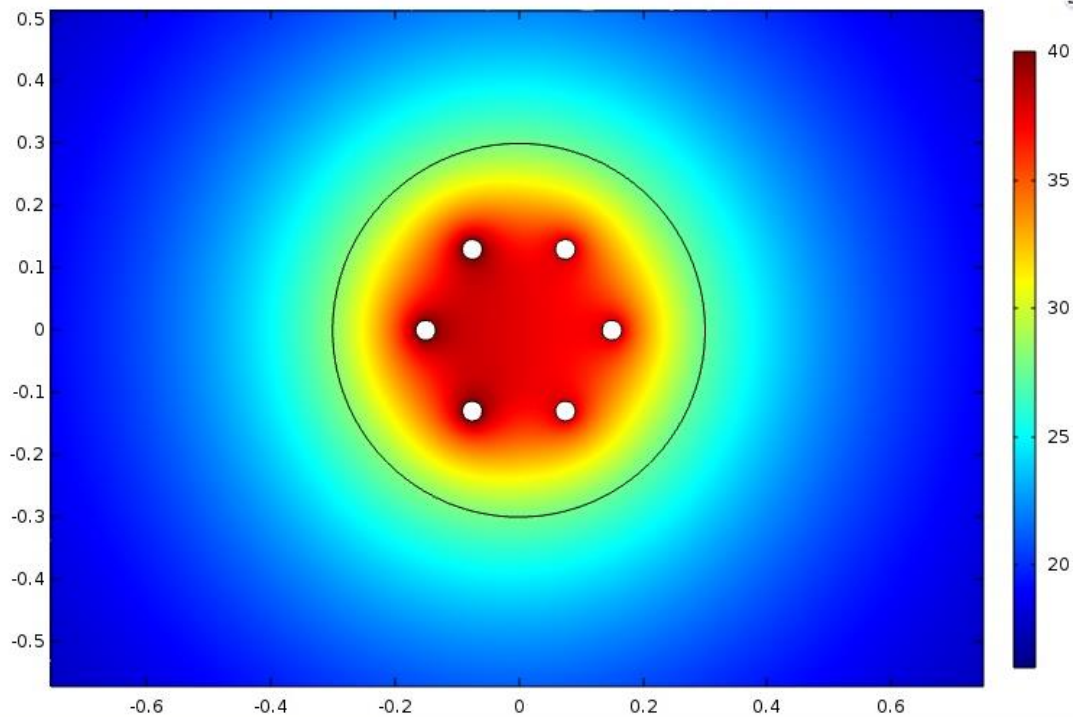


(b)

**Şekil A.10:** 10 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

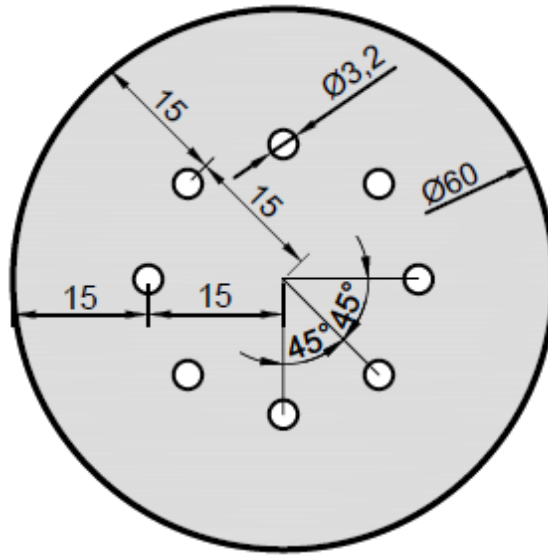


(a)

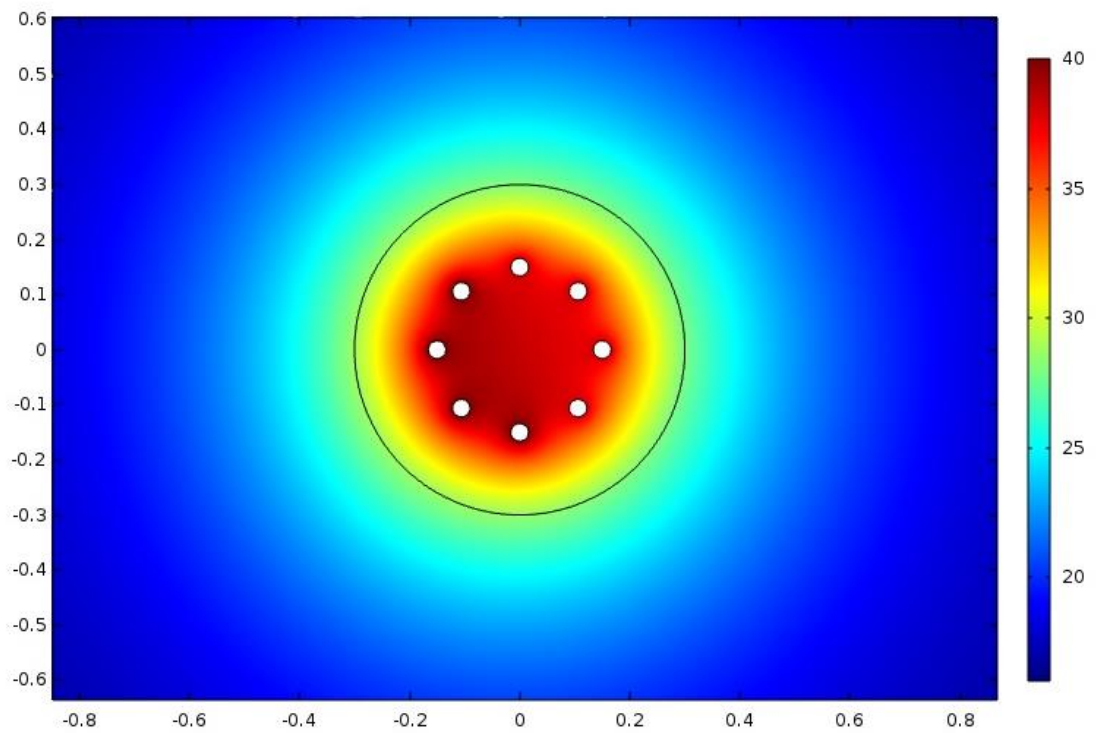


(b)

**Şekil A.11:** 11 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

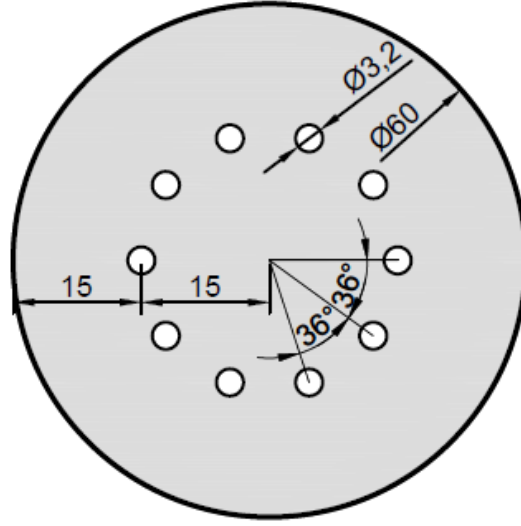


(a)

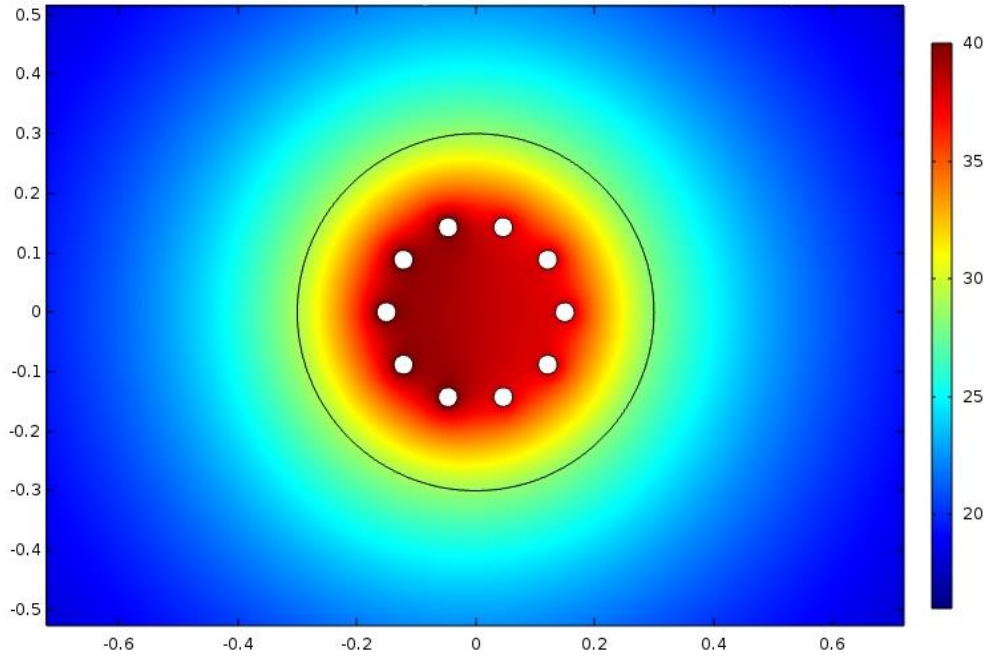


(b)

**Şekil A.12:** 12 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

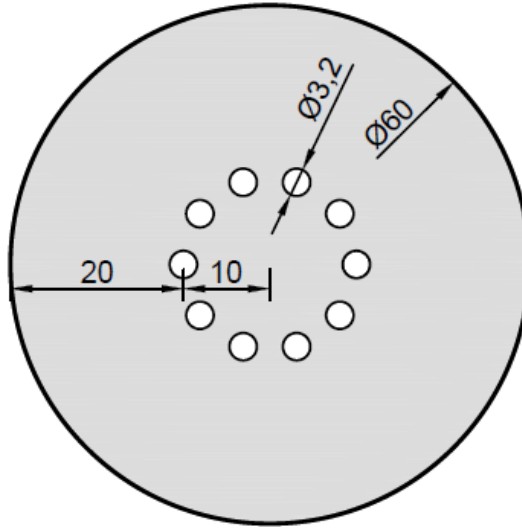


(a)

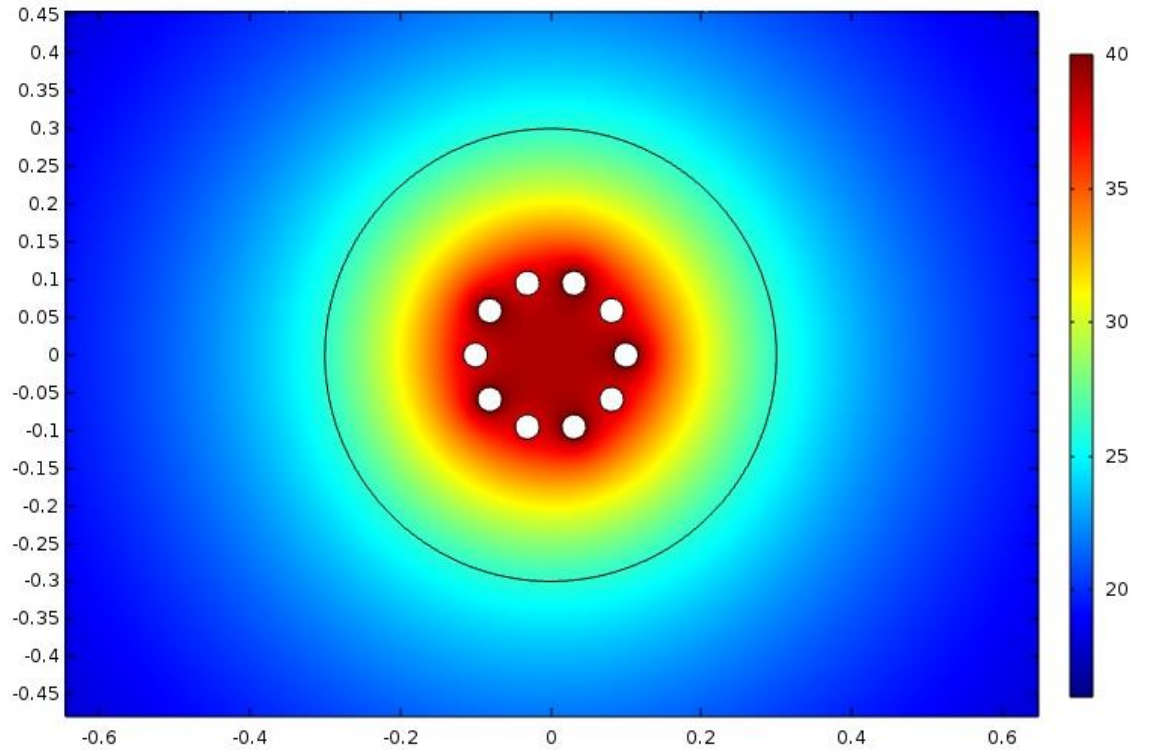


(b)

**Şekil A.13:** 13 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

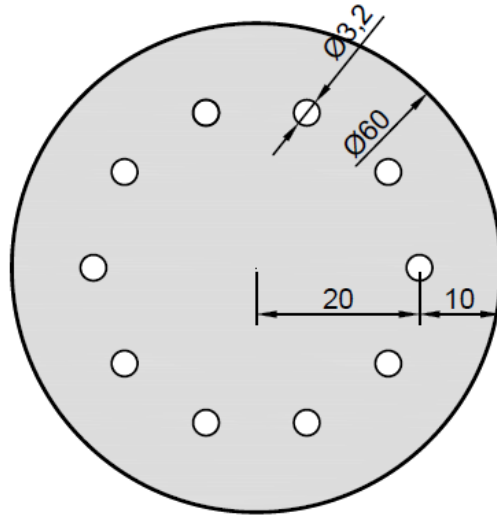


(a)

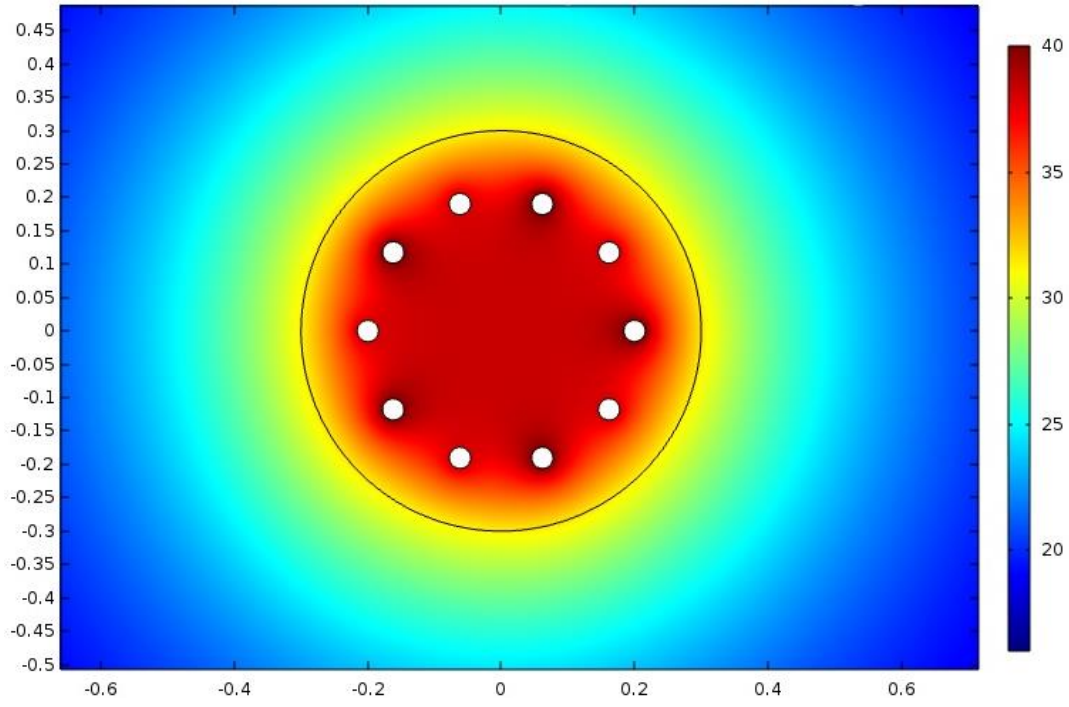


(b)

**Şekil A.14:** 14 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

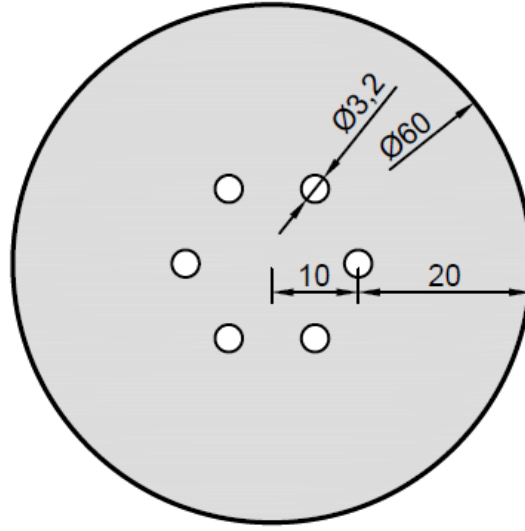


(a)

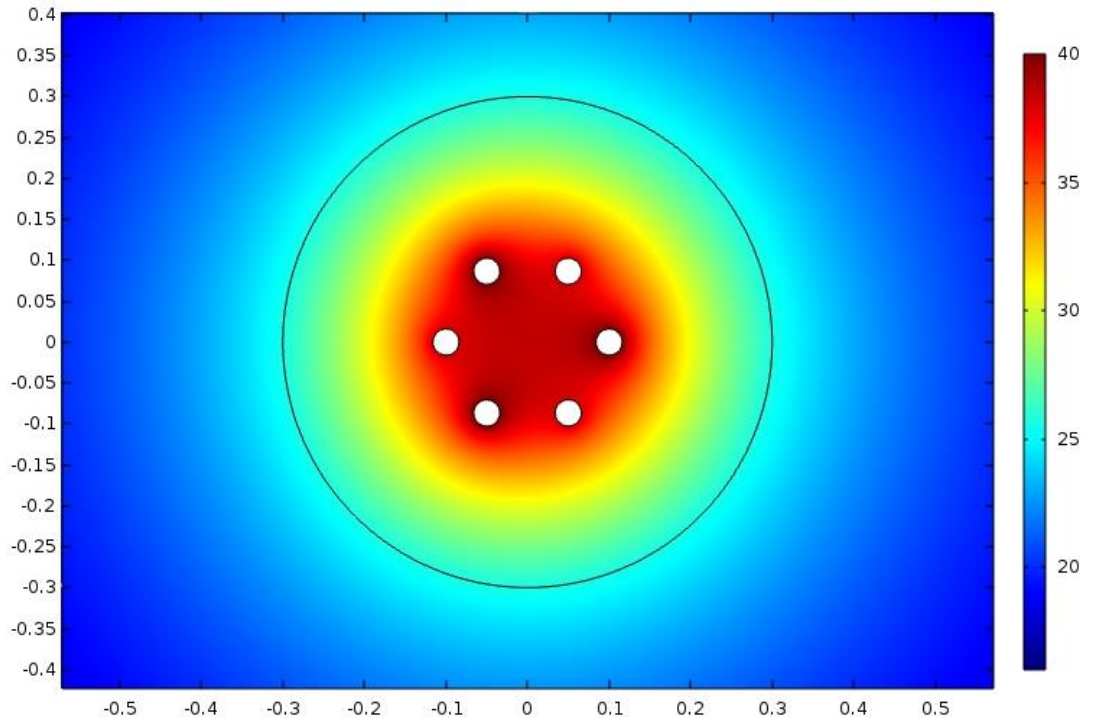


(b)

**Şekil A.15:** 15 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

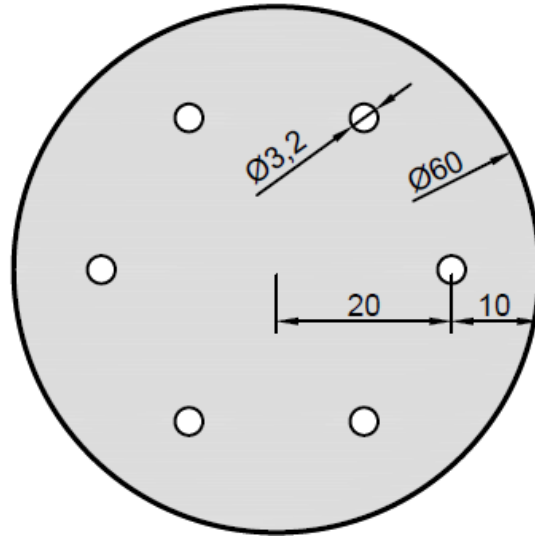


(a)

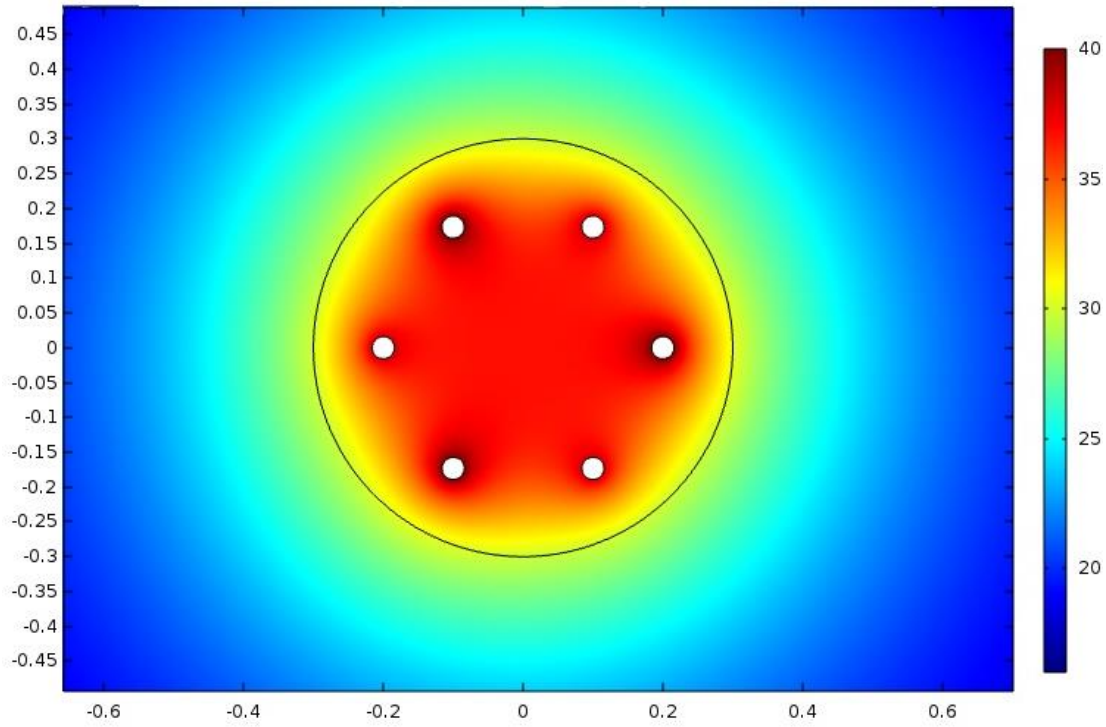


(b)

**Şekil A.16:** 16 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.



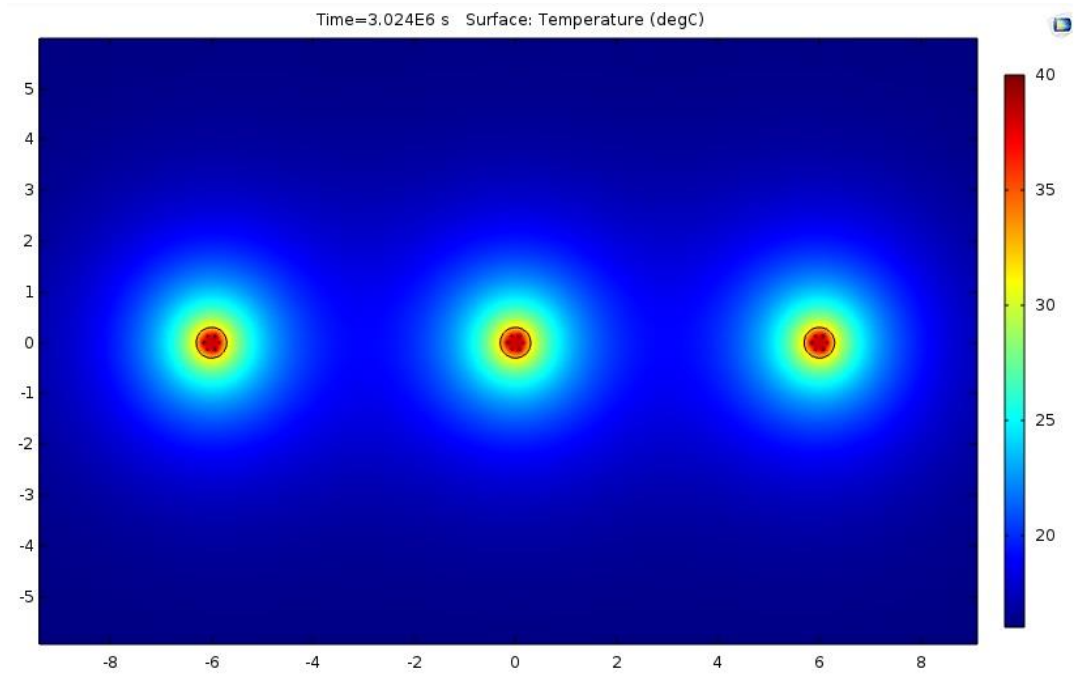
(a)



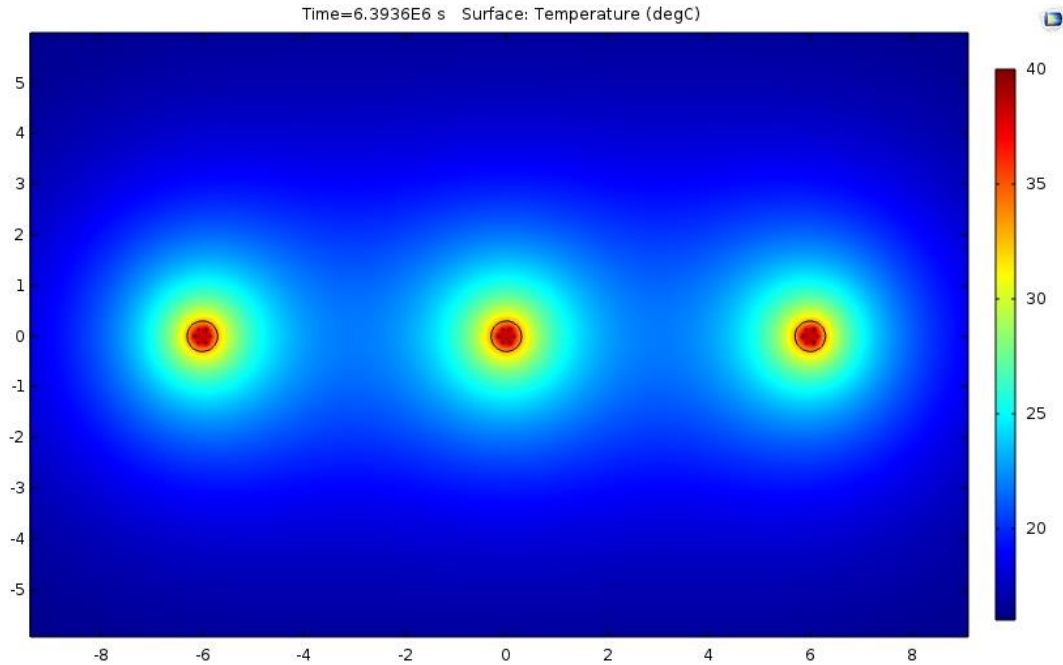
(b)

**Şekil A.17:** 17 numaralı analiz için; a) Kazık enkesiti b) Analiz sonundaki sıcaklık dağılımı.

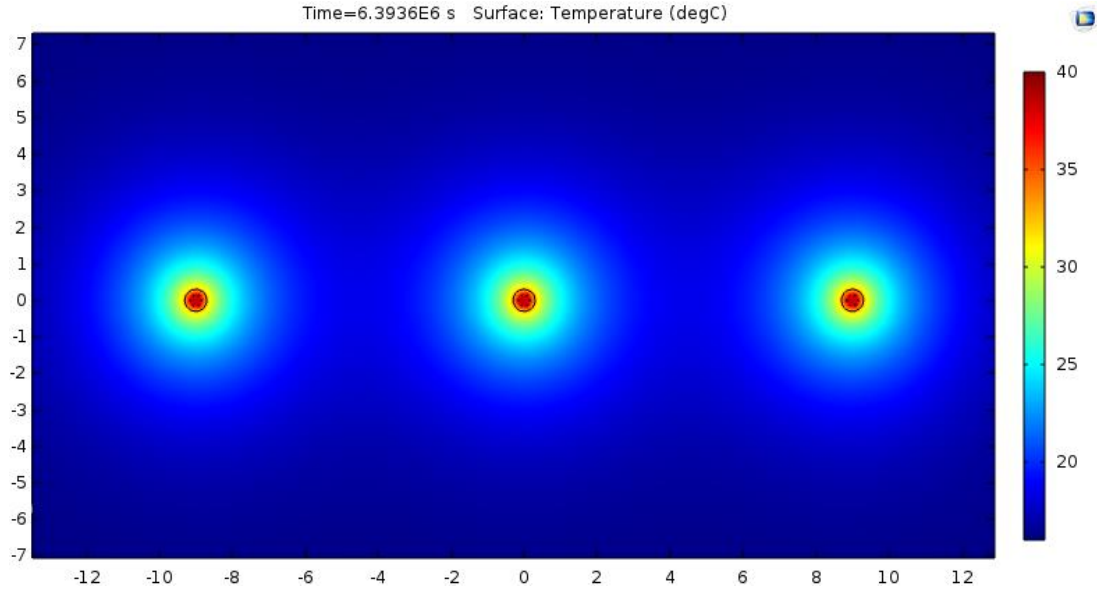
## EK B: KAZIK ARALIKLARINA GÖRE KAZIKLARIN ISIL ETKİLEŞİM GRAFİKLERİ



**Şekil B.1:** 6 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 35 günlük kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı (ilk ısıl etkileşim).



**Şekil B.2:** 6 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 2,5 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.



**Şekil B.3:** 9 m aralıklarla yerleştirilen 3 adet kazığın 2,5 aylık kesintisiz işletim sonundaki sıcaklık dağılımı.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** : Talha Özkaya  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : İstanbul 23.12.1986  
**E-Posta** : talhaozkaya@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2008, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü