

ENERJİ KAZIKLARININ PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMA DÜLGER CANOĞULLARI

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

MERSİN
EKİM - 2018

ENERJİ KAZIKLARININ PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMA DÜLGER CANOĞULLARI

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

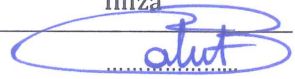
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Danışman
Doç. Dr. Özgür L. ERTUĞRUL

MERSİN
EKİM - 2018

ONAY

Fatma DÜLGER CANOĞULLARI tarafından Doç.Dr. Özgür L. ERTUĞRUL danışmanlığında hazırlanan "Enerji Kazıklaştığının Performans Analizi" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 26 Ekim 2018 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği/çokluğu ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof.Dr. Cahit BİLİM	
Üye	Doç. Dr. Özgür Lütfi ERTUĞRUL	
Üye	Doç.Dr. Önder Halis BETTEMİR	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/12/2018 tarih ve 2018-SO-1317 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
 - Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

26 Ekim 2018/26 October 2018

Fatma DÜLGER CANOĞULLARI

ÖZET

ENERJİ KAZIKLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Günümüzde nüfusun artışıyla birlikte mevcut enerji kaynaklarının yetersiz duruma gelmesi, kullanılan birçok kaynağın ise büyük oranda çevre kirliliğine neden olması sebebiyle yeni enerji kaynağı arayışları ivmelenmektedir. Hem çevre dostu hem de ekonomik olması açısından jeotermal enerjiye olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Son yıllarda özellikle Avrupa ülkeleri başta olmak üzere yaygınlaşmaya başlayan bir diğer uygulama da sığ zemin katmanlarının içerdiği ısı enerjisi potansiyelinden yararlanan enerji kazanım sistemleri olmaktadır. Enerji kazıkları da bahsedilen ısı kazanım sistemlerinin bir varyasyonu olarak uygulama olanağı bulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bina temellerinde kullanılan fore kazıklara entegre edilen ısı transfer döngü borularıyla oluşturulabilen enerji kazıklarının ısı performansları incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan GeoStudio paket programının TEMP/W ve SEEP/W modülleri kullanılarak enerji kazıklarının ısı kazanım performansına yeraltı suyunun etkisini saptamak amacıyla sayısal modellemeler yapılmıştır. Programdan elde edilen bulgularla, zeminde ısı yayılımı ve tekli – grup kazıklar kullanılarak farklı yeraltı suyu durumları için elde edilen enerji değerleri üzerinde yeraltı suyunun etkisi ele alınmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda, yeraltı suyunun sığ zemin hidrolik iletkenliği ve akım koşullarına bağlı olarak enerji kazıklarının ısı kazanım performansı üzerinde değişen miktarlarda etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Gerek yazlık kullanımda gerekse kışlık kullanımda yeraltı suyu hareketinin, sistemin enerji verimliliğinde olumlu etki yaptığı görülmüştür. Elde edilen bulgular ışığında Mersin ili kentsel yerleşim alanı için, hidrojeolojik koşullar ve lokal zemin özellikleri de dikkate alınarak analizler yapılmış olup incelenen kentsel yerleşim bölgesi için enerji kazıklı temel sistemlerinin verimli olabilecek düzeyde kullanım potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, enerji kazıkları, sonlu elemanlar yöntemi, yeraltı suyu

Danışman: Doç.Dr. Özgür L. Ertuğrul, Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF ENERGY PILES

The search for alternative sources of energy has accelerated recently as the increase in world's population has led to a decline in conventional energy sources which have also caused significant environmental pollution problems due to over consumption. With the advantages of being environmentally friendly and economical, interest in geothermal energy is increasing day by day. In recent years, another widely preferred application of geothermal energy has become the heat extraction systems which takes advantage of shallow soil strata. Energy piles which are a special kind of the mentioned shallow soil energy extraction systems are finding application potential. Within the scope of this study, energy piles which refer to a special shallow ground heat extraction system constructed by integrating heat exchange loop pipes into the reinforced concrete bored piles used as building foundations were investigated. The GeoStudio package program based on the finite element method was used to model the effect of groundwater on the performance of energy piles using TEMP/W and SEEP/W modules. The propagation of heat and the effect of groundwater on the energy extraction values obtained by single as well as group piles were investigated based on the findings obtained from the finite element software. In the light of the results, it was observed that groundwater conditions affect the heat extraction potential at various amounts depending on the hydraulic conductivity of shallow soils and flow characteristics. Ground water flow has positive contribution on the energy efficiency of the system in both summer and winter use. Based on the findings, analyses were performed for Mersin Province Metropolitan Area considering the local hydrogeological and geotechnical parameters which led to the result that energy pile systems has an efficient application potential for the investigated metropolitan region.

Keywords: Geothermal energy, energy piles, finite element method, groundwater

Advisor: Assoc. Prof. Özgür L. Ertuğrul, Department of Civil Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince değerli bilgilerini benimle paylaşan, ihtiyacım olduğu her zaman sabırla yardım ederek beni yönlendiren, meslek hayatımda benim için örnek teşkil eden danışman hocam Doç. Dr. Özgür L. ERTUĞRUL' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu günlere gelmemi sağlayan, her zaman arkamda olduklarını bildiğim kıymetli ailem; babam Kemal DÜLGER, annem Şenay DÜLGER, canım kardeşim Arda DÜLGER'e ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşime Ahmet Uğur CANOĞULLARI'na teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
2.1. Sığ Zemin Isı Sistemleri	9
2.1.1. Jeotermal Enerji	9
2.1.1.1. Jeotermal Enerjinin Sınıflandırılması	10
2.1.1.2. Jeotermal Enerjinin Sürdürülebilirliği ve Çevresel Etkileri	16
2.2. Sığ Zemin Tabakalarından Jeotermal Enerjinin Elde Edilmesi	18
2.3 Isı Transfer Mekanizmaları	18
2.3.1. Isı İletimi	20
2.3.2. Isı Taşınımı (Konveksiyon)	20
2.3.3. Radyasyon	21
2.4 Isı Transfer Parametreleri	21
2.4.1. Termal İletkenlik	22
2.4.2. Özgül Isı Kapasitesi	22
2.4.3. Hacimsel Isı Kapasitesi	23
2.4.4. Faz Değiştirme Isısı	24
2.4.5. Termal Yayılma Oranı	24
2.4.6. Jeotermal Gradyan	25
2.5. Isı Pompası Sistemleri	25
2.5.1. Isı Pompalarının Verimliliği	26
2.5.2. Sığ Zemin Kaynaklı Isı Pompaları	27
2.5.3. Sığ Zemin Kaynaklı Isı Pompası Çeşitleri	29
2.5.3.1. Açık Döngü Sistemleri	30
2.5.3.2. Kapalı Döngü Sistemleri	31
2.6 Enerji Kazıkları	35
2.6.1. Enerji Kazıklarında Birinci Devre Isı Transfer Mekanizması	36
2.6.2. Enerji Kazıklarında İkinci Devre Isı Transfer Mekanizması	39
2.7. Enerji Kazık Grupları (Enerji Temelleri)	39
2.8. Enerji Kazıklarının Geleneksel İklimlendirme Sistemlerine Göre Avantajları	40
2.9. Enerji Kazıklarının Uygulamasında Yaşanabilecek Olası Zorluklar	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1. Enerji Kazıklarının Isıl Verimliliğine Yeraltı Suyu Akışının Etkisi	42
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Tekil Kazık İçin Sonlu Elemanlar Modeli	46
4.1.1. Kış Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminden Isı Kazanımı) Tekil Enerji Kazığından Zemine Isı Yayılımının Modellenmesi (Kesit Analiz)	47
4.1.2. Kış Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminden Isı Kazanımı) Tekil Enerji Kazığından Zemine Isı Yayılımının Modellenmesi (Plan Analiz)	53
4.1.3. Kış Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılımının Modellenmesi (Akım Yönüne Paralel)	57

	Sayfa
4.1.4. Kış Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılımının Modellenmesi (Akım Yönüne Dik Yerleşim)	64
4.1.5. Yaz Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminde Isı Enjeksiyonu) Tekil Enerji Kazığının Plan Analizi	68
4.1.6. Yaz Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminde Isı Enjeksiyonu) Tekil Enerji Kazığının Kesit Analizi	72
4.1.7. Yaz Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılımının Modellenmesi (Akım Yönüne Paralel Yerleşim)	76
4.1.8. Yaz Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılımının Modellenmesi (Akım Yönüne Dik Yerleşim)	82
4.2. Akiferdeki Akış Hızının Enerji Kazıklarının Performansına Etkisinin Parametrik Olarak İncelenmesi	87
4. 3. Örnek Çalışma: Mersin Kentsel Yerleşim Alanı İçin Enerji Kazıklarının Isıl Verimliliğinin Araştırılması	91
4.3.1. Akdeniz İlçesi	92
4.3.2. Mezitli İlçesi	93
4.3.3. Toroslar İlçesi	94
4.3.4.Yenişehir İlçesi	95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	106

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Bazı maddelerin termal iletkenlik ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri	23
Tablo 2.2. Çeşitli maddelerin termal özellikleri	24
Tablo 2.3. Kıyaslanan iki sistemin ısıtma modunda enerji maliyetleri	27
Tablo 2.4. Kıyaslanan iki sistemin soğutma modunda enerji maliyetleri	27
Tablo 4.1. Analizlerde kullanılan ortak parametreler	47
Tablo 4.2. Kış modunda kazığın etrafındaki belirli noktalardaki sıcaklık değerleri	49
Tablo 4.3. Kış modu için elde edilen ısı yayılım parametreleri	49
Tablo 4.4. Kış dönemi kullanımında kesit analize göre tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim değerleri	52
Tablo 4.5. Kışlık kullanım için yapılan plan analizde tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim değerleri	56
Tablo 4.6. Akım yönüne dik konumlandırılan grupta verimlilik değerleri (plan analiz)	62
Tablo 4.7. Akım yönüne dik konumlandırılan grupta yer alan enerji kazıklarının verimlilik değerleri (plan analiz)	67
Tablo 4.8. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim yüzdeleri (plan analiz)	71
Tablo 4.9. Yaz dönemi kullanımı için yapılan kesit analizde tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim değerleri	75
Tablo 4.10. Akım yönüne paralel tarzda konumlandırılan kazık grubunda verimlilik değerleri (plan analiz)	81
Tablo 4.11. Akım yönüne dik tarzda konumlandırılan kazık grubunda verimlilik değerleri (plan analiz)	86
Tablo 4.12. Farklı yeraltı suyu akış hızları için tekil enerji kazığı ile sağlanabilecek enerji değerleri (plan analiz)	88
Tablo 4.13. Farklı yeraltı suyu akış hızları için tekil enerji kazığı ile sağlanabilecek enerji değerleri (kesit analiz)	88
Tablo 4.14. Farklı akış hızlarında akım yönüne paralel konumlandırılmış kazık grupları için elde edilen enerji değerleri (plan analiz)	89
Tablo 4.15. Farklı akış hızlarında akım yönüne dik konumlandırılmış kazık grupları için elde edilen enerji değerleri (plan analiz)	90
Tablo 4.16. Seçilen noktaların koordinatları	91
Tablo 4.17. Akdeniz ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri	92
Tablo 4.18. Akdeniz ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri	93
Tablo 4.19. Mezitli ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri	93
Tablo 4.20. Mezitli ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri	94
Tablo 4.21. Toroslar ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri	94
Tablo 4.22. Toroslar ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri	95
Tablo 4.23. Yenişehir ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri	95
Tablo 4.24. Yenişehir ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sığ ve derin jeotermal ısının sınıflandırılması	11
Şekil 2.2. Jeotermal sistemlerin sıcaklığa göre sınıflandırılması	12
Şekil 2.3. Yüksek sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın buhar türbinine güç vermek için kullanılması	13
Şekil 2.4. Orta derecede sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın ikili sisteme güç vermek için kullanımı	14
Şekil 2.5. Düşük sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın yerden ısıtma sağlamak için doğrudan kullanımı	15
Şekil 2.6. Sıcak kayalardan jeotermal enerji üretimi	16
Şekil 2.7. Isı transfer mekanizmaları	19
Şekil 2.8. Konveksiyon ısı transferinde sınır tabakasının gelişimi	21
Şekil 2.9. Çeşitli maddelerin yaklaşık termal iletkenlik oranları	22
Şekil 2.10. Doğrudan sirkülasyon sağlayan kapalı döngü sisteminin şematik diyagramı	32
Şekil 2.11. Dolaylı sirkülasyon sağlayan kapalı çevrim sisteminin şematik diyagramı	33
Şekil 2.12. Kapalı döngü yatay sistemlerin uygulama şekilleri	34
Şekil 2.13. Boru tipi kapalı döngü sistemi (çift U borulu tip)	34
Şekil 2.14. Enerji kazığı bileşenleri	35
Şekil 2.15. Enerji kazıklarından oluşan jeotermal sistem şeması	37
Şekil 2.16. Enerji kazıklarında ısı transfer mekanizması	37
Şekil 2.17. Enerji kazıkları için farklı tiplerdeki eşanjör yerleşleri	38
Şekil 4.1. Plan analiz modeli	46
Şekil 4.2. Kesit analiz modeli	46
Şekil 4.3. a) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	47
Şekil 4.4. a) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	48
Şekil 4.5. a) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	48
Şekil 4.6. a) Yeraltı suyunun bulunmadığı ve b) yeraltı suyunun bulunduğu analizlerde 30 gün, 180 gün ve 360 gün sonunda sıcaklığın kazık ekseninden ölçülen mesafelere bağlı olarak değişimi	49
Şekil 4.7. Kış dönemi kullanımı için kazık üzerindeki üç nokta için termal akı değerleri	50
Şekil 4.8. Kış dönemi kullanımı için kazık boyunca ortalama termal akı değerleri	51
Şekil 4.9. Kış modunda tekil enerji kazığının kesit analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri	52
Şekil 4.10. a) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	53
Şekil 4.11. a) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	53
Şekil 4.12. a) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	54
Şekil 4.13. Kış dönemi kullanımında 30 gün ve 360 gün sonunda kazık merkezinden sol tarafa doğru alınan kesit üzerindeki zemin sıcaklıkları (YAS mevcut değil)	54
Şekil 4.14. Kış dönemi kullanımında 30 gün ve 360 gün sonunda kazık merkezinden sol tarafa doğru alınan kesit üzerindeki zemin sıcaklıkları (YAS mevcut)	55
Şekil 4.15. Kış modunda tekil enerji kazığının plan analizinde kazık çevresindeki dört noktanın termal akış-zaman eğrisi	55
Şekil 4.16. Kış modunda tekil enerji kazığının plan analizinde kazığın zamana bağlı ortalama termal akış değerleri	56
Şekil 4.17. Plan analiz sonucunda tekil enerji kazığında zamana bağlı verim değerleri	57
Şekil 4.18. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	58

b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.19. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	58
b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.20. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	59
b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.21. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık – mesafe profilleri (YAS mevcut değil)	60
Şekil 4.22. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık – mesafe profilleri (YAS mevcut)	60
Şekil 4.23. Gruptaki A1 kazığı için termal akı-zaman grafiği	61
Şekil 4.24. Gruptaki A2 kazığı için termal akı-zaman grafiği	61
Şekil 4.25. Gruptaki A3 kazığı için termal akı-zaman grafiği	62
Şekil 4.26. Kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) plan analizinde akım yönüne paralel konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu olarak karşılaştırılması	63
Şekil 4.27. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	64
b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.28. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	64
b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.29. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	65
b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.30. Gruptaki B1 kazığı için termal akı-zaman grafiği	65
Şekil 4.31. Gruptaki B2 kazığı için termal akı-zaman grafiği	66
Şekil 4.32. Gruptaki B3 kazığı için termal akı-zaman grafiği	66
Şekil 4.33. Kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) plan analizinde akım yönüne dik konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu olarak karşılaştırılması	68
Şekil 4.34. a) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	69
Şekil 4.35. a) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	69
Şekil 4.36. a) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	70
Şekil 4.37. Yaz modunda tekil enerji kazığının plan analizinde kazık çevresindeki dört noktanın termal akış-zaman eğrisi	70
Şekil 4.38. Yaz dönemi kullanımı için kazık boyunca ortalama termal akı değerleri	71
Şekil 4.39. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının plan analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri	72
Şekil 4.40. a) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	73
Şekil 4.41. a) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	73
Şekil 4.42. a) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16$ m/gün)	74
Şekil 4.43. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının kesit analizinde kazık çevresindeki üç adet noktanın termal akı- zaman eğrisi	74
Şekil 4.44. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde tekil kazık için termal akı- zaman grafiği	75
Şekil 4.45. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının kesit analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri	76
Şekil 4.46. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	77
b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.47. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	77
b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	

Şekil 4.48. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	78
b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.49. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık – mesafe profilleri (YAS mevcut değil)	78
Şekil 4.50. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık – mesafe profilleri (YAS mevcut)	79
Şekil 4.51. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C1 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	80
Şekil 4.52. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C2 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	80
Şekil 4.53. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C3 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	81
Şekil 4.54. Yaz dönemi kullanımında (sığ zemine ısı enjeksiyonu) akım yönüne paralel konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu karşılaştırılması (plan analiz)	82
Şekil 4.55. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	83
b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.56. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	83
b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.57. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil)	84
b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)	
Şekil 4.58. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde D1 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	84
Şekil 4.59. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde D2 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	85
Şekil 4.60. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde D3 enerji kazığı için termal akı-zaman grafiği	85
Şekil 4.61. Yaz dönemi kullanımında (sığ zemine ısı enjeksiyonu) akım yönüne dik konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu karşılaştırılması (plan analiz)	87
Şekil 4.62. Mersin ili hidrolik yük haritası	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltma/Simge	Tanım
E_0	Azami enerji üretimi
m	Kütle
c	Özgül ısı
ΔT	Sıcaklık farkı
Q	Toplam ısı
T_{in}	Giriş sıcaklığı
T_{out}	Çıkış sıcaklığı
p	Kütle yoğunluğu
α	Termal yayılma oranı
k	Isıl iletkenlik
H	verilen ısı oranı
W	Yapılan iş
θ_1	Yüksek sıcaklık değeri
θ_2	Düşük sıcaklık değeri
E_{max}	Maksimum elektrik gücü
COP	Isı pompalarının verimlilik katsayısı
F	ısı akısı
λ	ısıl iletkenlik
T	sıcaklığı
x	x yönündeki mesafe
h	zemin-su -buz karışımının ısı depolama kapasitesi
y	y yönündeki mesafe
L	Faz değiştirme ısı
Q_u	toplam donmamış hacimsel su içeriği
$\rho_s C_{ps}$	toprağın hacimsel ısı kapasitesi
$C_{pa/w}$	hava ya da suyun kütle spesifik ısı
θ_w	hacimsel su içeriği
$\dot{m}_a$	havanın kütle akış hızı
θ_u	donmamış su içeriği
θ_0	zemin porozitesi
K_t	toprak-su-buz karışımının ısıl iletkenliği
K_w	suyun ısıl iletkenliği
K_i	buzun ısıl iletkenliği
K_s	zeminin ısıl iletkenliği
q_w	hız
i	toplam hidrolik eğim
k_x	x yönünde hidrolik iletkenlik
k_y	y yönünde hidrolik iletkenlik
t	zaman
T_h	toplam yük
η	verimlilik

1. GİRİŞ

Günümüze kadar en yaygın ve yoğun olarak kullanılan enerji kaynağımız fosil yakıtlar olmuştur. Artan kullanıma bağlı olarak dünyadaki petrol rezervlerinin giderek azalması alternatif enerji kaynakları üzerinde yapılan çalışmalara ivme kazandırmaktadır. 2010 yılı itibarıyla mevcut petrol rezervlerinin yarısının tüketildiği göz önüne alınırsa fosil yakıtların yalnızca kısa vadede dünya enerji talebini karşılayabileceği bilinmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının efektif bir şekilde kullanıma geçirilmesi bütün ülkeler için öncelikli hale gelmiştir. Günümüzde öncelikli olarak üzerinde durulan yenilenebilir enerji kaynaklarının güneş ve rüzgar enerjisi olduğu görülmektedir. Sahip olduğumuz önemli bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı ise yerkürenin jeotermal kaynaklı ısı potansiyelidir. Ancak geleneksel olarak jeotermal enerjinin yer yüzeyine aktarılabilmesi için derin kuyuların açılması ve yeterli kapasitede pompa ve ekipmanlarının kullanıma alınabilmesi bireysel kullanıcılar ya da küçük ölçekli firmalar için gerek ekonomik yönden gerekse uygulama yönünden pek çok zaman mümkün olamamaktadır. Bu noktada sığ zeminlerin ısı potansiyeli alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Yerküremizi oluşturan sığ zeminlerin sıcaklık yönünden stabil bir ortam teşkil ettiği göz önüne alındığında ısı dönüşüm sistemleri kullanılarak sığ zemin ortamındaki ısı enerjisinin yeryüzündeki yapıların iklimlendirme ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılabileceği görülmektedir. Buna ilave olarak sığ zeminler ve yeraltı akiferlerinin güneşten kazanılan enerjiyi depolama konusunda önemli bir etkiye sahip olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulmaktadır [1].

Genel olarak sığ zeminlerin, belli bir derinlikten itibaren sıcaklığının yıl içinde sabit olması ve mevsimsel etkilere maruz kalmaması, bu ortamda mevcut olan ısı potansiyelinin yapılarda gerek ısınma gerekse soğutma amaçlı olarak kullanılabilmesine imkân vermektedir. Bu durumdan faydalanmak amacıyla sığ zemin ısı kazanım sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler yatay ya da düşey şekilde zemine yerleştirilen enerji transfer boruları ile ısı potansiyelinin kullanıma alınabilmesini hedeflemektedir. Enerji kazıkları olarak adlandırılan ısı sistemleri ise bahsedilen ısı kazanım sistemlerinin bir varyasyonu olarak ortaya çıkmıştır.

Bilindiği üzere betonarme fore kazık elemanları, sığ temellerin taşıma kapasitelerinin üst yapıyı güvenle taşıyabilecek mertebede olmadığı durumlarda derin temel sistemi olarak görev yapmak suretiyle üst yapı yüklerini daha derinde yer alan stabil zemine aktarırlar. Bunun dışında, yan yana yapılmış sıralı kazıklar, gerektiğinde ankraj elemanları ile güçlendirilerek istinat yapısı olarak projelendirilebilirler. Ayrıca çekme kuvvetlerini ve yanal yükleri taşımak üzere tasarlandığı gibi bazı kazık türleri zeminin sıkıştırılmasında da aktif rol oynayarak zemin iyileştirme tekniği olarak kullanılabilmektedir.

Bilindiğı üzere yeterli taşıma gücüne sahip zemin tabakalarının yüzeysel temel yapımına müsaade etmeyecek mertebedeki derinliklerde yer alması, temelin altındaki zemin tabakalarının büyük farklılıklar göstermesi, suyla temas ettiğinde kabaran veya ani çökme yapan zeminlerin mevcudiyeti, küçük oturum alanına sahip yapılar ve statik sistemleri bakımından farklı oturmalara hassas olan yapılarda kazıklı temeller sıklıkla kullanılmaktadır. Standart imalat teknikleriyle inşa edilen fore kazıklar, projesine göre değişik çaplarda imal edilebilmekte olup 60-80 metre derinliklere kadar imal edilebilmektedir.

Binaların inşasında temel altına veya inşaat alanının etrafında imal edilen kazıklar sadece temelin taşıma kapasitesinin arttırılmasında veya inşaat alanının etrafındaki toprak yapısının desteklenmesinin ötesinde, yaşam alanlarımızı oluşturan binaların iklimlendirme ihtiyacının tamamının ya da bir kısmının karşılanmasında kullanılabilir. Bu şekilde kullanılan kazıklara literatürde “enerji kazıkları” adı verilmiştir [2].

Zemin oturmalarının azaltılması ve taşıma kapasitesinin arttırılması maksadıyla fore kazıklı temel sistemi ile tasarlanan bir yapıda, zaten yapısal bir gereklilik nedeniyle imal edilmekte olan kazıklara enerji kazığı özelliğı kazandırılması sayesinde toprağın enerjisinden istifade etme fikri enerji verimliliğı kaygılarının hat safhaya çıktığı günümüzde giderek önem kazanmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Claesson ve Eskilson [3], sabit akım koşullarında yeraltı suyunun tek borulu bir ısı değiştirici sisteme etkisini tanımlamak için analitik bir teori oluşturmuşlar ve bu teori sonucunda yeraltı su hareketlerinin zemin bünyesinde homojen olduğu varsayılarak ısı değiştirici sisteme termal etkisinin ihmal edilebilir olduğunu öne sürmüşlerdir. Bununla birlikte, Claesson ve Eskilson, zemin profilinin temel itibarıyla kayalardan meydana geldiği bir senaryo üzerinde çalışmışlardır. Claesson ve Eskilson tarafından sunulan bir diğer çalışma 10^{-6} m/s hidrolik iletkenliğe sahip bir zeminde 1/66 hidrolik eğime sahip bir akım modelinde yeraltı suyunun etkisinin incelenmesine ilişkindir. Darcy kanununun (akış hızı=hidrolik iletkenlik×hidrolik eğim) göz önünde bulundurulmasıyla, Claesson ve Eskilson tarafından en yüksek akış hızının yalnızca 0,0013 m/gün olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, doğal yeraltı su hareketlerinin termal kapasiteye etkisinin önemsiz olduğuna yönelik elde edilen bulguların, zemin özelliklerinin daha yüksek bir yeraltı su akış hızını belirleyebileceği durumlarda geçerli olmadığı saptanmıştır.

Lee ve diğ. [4], Pahud ve Matthey [5] tarafından gerçekleştirilen termal tepki deneyi (thermal response test) verilerinden yararlanarak, bir zeminin gerçek ısı iletkenliğini hesaplayabilen üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Bu modeli oluştururken deney yapılan ısı değiştirici sistemde akışkan olarak su tercih edilmiştir.

Chiasson ve diğ. [6], yüksek hidrolik iletkenlik değeri olan bir zeminde, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ve kütle / ısı taşınım modelini kullanarak yeraltı suyu akışının ısı değiştirici sistemin performansı üzerinde önemli bir etkisi olabileceğini bulmuşlardır.

Wang ve diğ. [7], yeraltı suyu akışının zemin kaynaklı ısı değiştirici sistemin performansı üzerindeki etkisinin anlaşılması için basitleştirilmiş sayısal bir yaklaşım sunmuşlardır. TRNSYS [8] yazılımı kullanılarak yapılan modelleme çalışmasında, yeraltı suyu akımının olduğu ve bulunmadığı durumlar için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yeraltı suyunun sığ zeminde termal profili değiştirdiği belirtilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar yaz ve kış aylarında sırasıyla, %9,8 ve %12,9 oranında ortalama bir performans artışına işaret etmektedir. Bahsedilen performans artışının büyüklüğünün, büyük ölçüde yeraltı suyunun akım özellikleri ile zemin tabakalarının yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Nam ve diğ. [9], bir enerji kazık sisteminin enerji çıkışı üzerinde yeraltı su akışının etkisini tahmin edebilen bir simülasyon kodu geliştirerek benzer bir araştırma yapmışlardır.

Fan ve diğ. [10], sığ zeminde ısı yayılımını tahmin etmek üzere matematiksel bir model önererek bu modeli daha önceden geliştirilmiş zemin kaynaklı ısı pompası simülasyon programına entegre etmişlerdir. Yeraltı suyu varlığının, ısı değiştirici boru ile çevredeki toprak

arasındaki ısı transferini önemli ölçüde etkilediği ve dolayısıyla topraklı kaynaklı ısı pompası sisteminin enerji çıktısını etkilediği sonucuna varmışlardır.

Katzenbach ve diğ. [11], Frankfurt, Almanya'daki bir jeotermal mevsimsel termal depolama sisteminin işletilmesinin komşu mülkler üzerindeki olası yüzey altı termal etkisini araştırmak için sonlu elemanlar modeli (FEM) simülasyonları oluşturmuşlardır. Analiz edilen proje kapsamında 1,86 m çapında ve 27 m derinliğe ulaşan 302 adet temel altı kazıklarından bulunmaktadır. Bunlardan 262 adet kazık, ısı eşanjörü boruları ile donatılmıştır. Sabit bir ısı çekme oranı için, yeraltı suyu akışının, ısı değiştirici sistemin yakınında sıcaklık düşüşünde bir azalmaya neden olduğu ve 1m/gün mertebesindeki bir yeraltı suyu akım hızı için, inceleme sahasının yakınında 1,5°C sıcaklık artışına neden olduğu gözlenmiştir.

Gehlin ve diğ. [12], çatlak kayada yeraltı suyu akımının termal etkilerini araştırmak için iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Gehlin ve Hellstroma, düşük özgül akış hızlarının bulunduğu durumlarda bile ısı transfer özelliklerinin belirgin bir şekilde arttırılmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Bir yazılım paketi kullanılarak, ısı değiştirici sistemin ısı çıkışı üzerinde yeraltı su akışının etkisi, birkaç akış hızı ve akifer kalınlığı için Clausen [13] tarafından incelenmiştir. 0 ile 5 m/gün aralığında değişen akış oranları için bir ısı değiştirici sistemin termal performansı incelenmiş (kilde tipik yeraltı suyu akış hızlarını 4×10^{-7} m/gün, sıkı kumda 0,014-0,16 m/gün ve çakılda 8,4 m/gün'e kadar) ve yeraltı suyunun varlığının zemin kaynaklı bir ısı pompası sisteminin termal performansında önemli bir iyileşmeye neden olacağı sonucuna varılmıştır.

Abdelaziz ve diğ. [14], üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak enerji kazıklarının ısı performansına etki eden parametreleri incelemişlerdir. 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 yapmadığını belirtmişlerdir. Kazık özellikleri ve kazık çapı da önemli bir etkiye sahip değilken en önemli faktörün zeminin ısıl iletkenliği olduğu belirtilmiştir.

Özüdoğru ve diğ. [15], sığ zeminde ısı transferini araştırmak amacıyla üç boyutlu sayısal model geliştirmişlerdir. Modelden elde edilen sonuçlar ile arazide gerçekleştirilen termal iletkenlik deney sonuçları karşılaştırılarak farklı geometrideki kazıkların modellenenbilmesi ve yorumlanması için uygun hale getirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda, geliştirilen sayısal modelin ısıl iletkenlik deneyleri boyunca ısı değişimini iyi bir şekilde yansıtip, doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır.

Park ve diğ. [16], iki farklı ısı transfer boru tipi kullanarak (U-tüp ve W tipi borular) ısıl performans karşılaştırması yapmışlardır. Arazide hazırlanan tam boyutlu test kazıkları ile gerçekleştirilen termal tepki deneyinin ardından kazıklar üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile modellenerek zemin ısıl iletkenliği ve kazık ısıl dirençleri belirlenmiş ve daha sonra sayısal

modelde iki farklı boru tipi (U tipi ve W tipi) kullanılarak oluşturulmuş olan enerji kazıkları için 72 saatlik termal tepki deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında devamlı işletim durumunda iki test kazığı da enerji kazanımı açısından birbirine yakın verimlilik sunarken, 8 saat aralıklı işletimde üç U-tüp borulu enerji kazığı, W tip borulu kazığa göre %15 daha fazla ısı değişimi sağlayabilmiştir.

Angelo Zarella ve diğ. [17], çift U borulu ve spiral borulu ısı değiştirici sistemlerin ısı davranışlarını incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Yazarlar önceden oluşturdukları ve “direnc 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 ayırmakta, yüzey ve derin bölgelerde ısınsın sadece derinlik yönünde iletildiği, kuyu bölgesinde ise iki boyutlu ısı transferi gerçekleştiği kabulü ile işlem yapılmaktadır. İncelenen farklı durumlar göz önüne alındığında her durumda spiral borunun ısı performansının çift U-tüp boruya göre daha iyi çıktığı belirtilmiştir.

Angelo Zarella ve diğ. [18], başka bir çalışmada, geliştirdikleri model ile üç U-tüp borulu ve sargı (spiral) borulu enerji kazıklarını ısıl açıdan karşılaştırmışlardır. Arazide tam boyutlu deney 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 spiral borulu kazığın üçlü U-tüp borulu kazığa göre daha iyi ısı transfer oranı sağladığı ama çok daha fazla basınç kaybı yaşadığı görülmüştür.

Loveridge ve diğ. [19], enerji kazığının ısıl direncini etkileyen faktörleri incelemişler ve anahtar faktörlerin betonun ısıl iletkenliği, ısı değiştirici boru sayısı ve bu boruları saran beton kalınlığı olduğunu belirtmişlerdir. Genellikle daha fazla sayıdaki ısı değiştirici borunun daha az beton ile örtüldüğü durumlarda ısıl direncin daha az olduğu ve geniş çaplı kazıkların ısıl açıdan sabit duruma gelmesi için birkaç günün geçmesi gerektiği, bu süredeki betonun ısı depolamasını da göz önünde bulunduran tasarım metotlarının daha doğru sonuçlar vereceği belirtilmiştir.

Bezvan ve diğ. [20], üç boyutlu sayısal modelleme ile tek U, tek W ve sargı (spiral) borulu enerji kazığı konfigürasyonları üzerinde ısıl performans değerlendirmesi yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. En yüksek düzeyde verimlilik sağlayabilecek sistemi bulabilmek için spiral borulu kazıkların farklı sargı aralıkları ile oluşturulması ve kazıkların paralel ya da seri bağlı olma durumlarını da incelemişlerdir. En verimli kombinasyonun birbirine seri bağlı spiral borulu enerji kazıklarında olduğu görülmüş ve çalışma kapsamında incelenen $s=0,2m$, $s=0,4 m$ ve $s=0,6 m$ sargı aralıkları için en etkili ısı transferinin $s=0,4 m$ sargı aralığına sahip olan test kazıklarında gerçekleştiği gözlenmiştir.

Franco ve diğ. [21], enerji kazıklarında yapılan termal tepki deneylerinin çizgi kaynak metodu ile yorumlanmasının geçerliliğini ve termal tepki deneylerinin sonuçlarına etki eden

faktörleri COMSOL [22] yazılımı aracılığıyla sayısal olarak incelemişlerdir. Enerji kazıklarının sınırlı olan boyu ve yapılan bazı kabullere bağlı olarak çizgi kaynak metodu kullanımının hatalara yol açabileceğini ve bu durumda bir takım düzeltme faktörlerinin kullanılmasının gerekliliğini belirtmişlerdir.

McCartney ve diğ. [23], yürüttükleri çalışmada enerji kazıklı temeller ve geleneksel temelleri karşılaştırmış ve enerji kazıklı temellerin performansının binanın davranışlarıyla ilişkili olabileceği kanısına varılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca zemin yapısındaki değişimler, kazıkların büzülme ve genişmesinin de kazık performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Cui diğ. [24], çalışmalarında içerisine spiral bobinler gömülü enerji kazıklarında ısı iletimini incelemişlerdir. Bobin sargı aralıkları ve yerlerinin çözüme etkisini, halka bobin ile silindirik kaynak modelleri arasındaki kıyaslamaları değerlendirip tartışmışlardır. Kıyaslamalar ve değerlendirmeler sonucunda geliştirilmiş sonlu halka bobin kaynak modelinin kazık jeotermal ısı eşanjörünün ısı transfer sürecini doğru bir şekilde tanımlayabildiğini göstermektedir.

Laloui ve diğ. [25], sıcaklık değişimlerinin enerji kazıklarının davranışları üzerindeki ana etkilerini incelemişler ve yeni bir geoteknik analiz yöntemi sunmuşlardır. Önerilen yöntem, çevredeki toprağın kayma direnci ve kazık altındaki zeminin uç direncini göz önüne alan yük aktarım yöntemine dayanmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemde termal yükleme durumunda kazık ve desteklenen yapı arasındaki etkileşim de dikkate alındığından farklı özelliklere sahip zemin profillerine göre değerlendirilmesini sağlayabilmektedir. Önerilen yöntem, enerji kazıklarının maruz kaldığı termal ve yapısal yük kombinasyonları altında sergileyecekleri deformasyonların test kazıkları üzerinde yerinde yapılan ölçümleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, her vaka için duruma özel bir analiz yapılması gerektiği vurgulanmış ve önerdikleri yöntemin pek çok kullanıcı tanımlı problem için yeterli düzeyde tahmin olanağı sağladığı düşünülmüştür.

Batini ve diğ. [26], çalışmalarında tam ölçekli bir enerji kazanım sisteminin termomekanik yanıtını, farklı boru konfigürasyonları, temel en/boy oranları, ısı değiştirici akışkanın farklı kütleli akış oranları ve akışkanın farklı karışım durumları için araştırmışlardır. Elde edilen veriler sonucunda, enerji kazıklarının hem enerji kazanımı hem de geoteknik performanslarında yapı temelinin en/boy oranı ve enerji kazıklarında kullanılan boru konfigürasyonlarının önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Buna karşılık, akışkanın farklı kütle akış oranlarının sadece enerji performansını kısmen etkilediği, çeşitli su- antifriz karışımlarının da enerji kazıklarının ne enerji ne de geoteknik performansını etkilediği belirtilmiştir.

Gashti ve diğ. [27], toprak kaynaklı ısı değiştirici sistemlerinin kullanıldığı bir enerji kazık sisteminin yapısal ve geoteknik davranışını, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalar sonucunda, enerji kazığının binanın soğutma işlemi için kullanıldığında genişlemeye yatkın olduğu ve bu termal etkiye bağlı olarak kazık shaftında ek gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan ek gerilmeler ve deformasyonların kazıkların taşıma kapasitesi, kayma mukavemeti ve oturma davranışlarında değişikliklere neden olabilecekleri öngörülmektedir.

Fadejev ve diğ. [28], tek katlı ticari bir binada iklimlendirme amacıyla kullanılması planlanan enerji kazıkları ve ısı pompası sistemini detaylı bir şekilde modellemeye odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan modellemeler IDA-ICE [29] yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve farklı zemin yüzey sınır koşullarında, enerji kazıklarının yerleşim konfigürasyonuna bağlı olarak kontrol durumuna göre %23 daha verimli olabileceği belirtilmiştir.

Kaltreider ve diğ. [30], zemin ile ısı transferi yapılan temellerin incelenebilmesi amacıyla üç boyutlu sonlu hacim metodunu (FVM) baz alan bir model geliştirmişlerdir. Önerilen model ayrıca A.B.D. Colorado eyaletinde yer alan Boulder şehri için saatlik hava durumu verilerine dayanan yıllık simülasyonlar dikkate alınarak termo-aktif temel ile üstündeki bina arasındaki termal etkileşimi araştırmak için kullanılmıştır. Araştırma sonucunda termo-aktif temelin, ısıtma mevsiminde standart bir temel ile karşılaştırıldığında çalışma zamanının %57'sinde ısı kaybına neden olurken, soğutma mevsiminde ise çalışma zamanının yalnızca %32'sinde zeminden temele ısı transferi olduğu gözlemlenmiştir.

Cecinato ve diğ. [31], enerji kazıklarının ısı verimliliğini araştırmak üzere üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri geliştirmişlerdir. Yaptıkları analizler ışığında enerji verimliliğine etki eden en etkili tasarım parametresi olarak kazık içerisinde yer alan ısı transfer borularının sayısının makul düzeyde artırılması olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte kazık çapının arttırılmasının ısı transfer borularının miktarının sabit tutulması durumunda ısı verimliliğe önemli düzeyde katkı veremeyeceğini ortaya koymuşlardır.

Malaska ve diğ. [32], çalışmalarında enerji kazıklarının yeraltı suyu etkisindeki ısı performansını incelemişlerdir. Sistemin işletim başlangıcında, U-borularındaki ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığı ile zemin sıcaklık profili arasında iki farklı koşulda (yeraltı suyu akışı olan veya olmayan) belirgin bir fark bulunmazken, sistemin çalışma sürecinde ısı taşıyıcı sıvı ve çevredeki zemin arasında daha büyük sıcaklık farkları oluşması nedeniyle, yeraltı suyu akımının etkileri daha belirgin olarak gözlenmeye başlanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda yeraltı suyunun akımının enerji çıkarma potansiyelini önemli ölçüde artıracığı gözlemlenmiştir.

Malaska ve diğ. [33], bir diğer çalışmalarında, soğuk iklim bölgelerindeki enerji kazık temellerinin performansını, yeraltı suyu akımının etkileri ve kısa süreli dengesiz mevsimsel

termal yüklemeleri dikkate alarak sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre enerji kazıkları orta dereceli yeraltı suyu akımı (yaklaşık 1,65-8,0 m/s) altında kullanıldığında, yeraltı suyu akışı olmayan doymuş koşullara kıyasla sistem verimliliği yaklaşık %20 oranında artmıştır.

Rivera ve diğ. [34], sondaj kuyularına yerleştirilen kapalı tip ısı değiştirici sistemlerin davranışını uzun vadede gözlemlemek amacıyla bir saha uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında temel olarak sistemin performansı için sığ zemin ısı sisteminin çalışma sürecinde zemindeki sıcaklık değişimine odaklanılmış ve ısı akışları analitik modeller kullanılarak karakterize edilmiştir. Saha çalışması ve analizlerin, sığ jeotermal uygulamaların sürdürülebilirliği ve yenilenebilirliğinin değerlendirilmesi için aydınlatıcı olduğu belirtilmiştir.

Suryatriyastuti ve diğ. [35], çalışmalarında monotonik termal yüklemeye tabi tutulan enerji kazıklarının mekanik davranışlarını sonlu farklar yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Bu kapsamda sığ zemin ısı sisteminin verimliliği iki farklı örnek üzerinden incelenmiştir. Birinci örnekte zemin-enerji kazığı arasında mükemmel bir temas yüzeyi bulunduğu varsayılmış, ikinci örnekte ise kayma ve ayrılmaya izin veren türde bir arayüzün dikkate alındığı belirtilmiştir. İkinci örnekteki enerji kazığı sisteminin toplam deformasyonunun, birinci örnekte incelenen sistemin deformasyonlarından daha küçük olduğu gösterilmiştir.

Loria ve diğ. [36], farklı büyüklükteki termal ve eksenel mekanik yük kombinasyonlarının doymuş kumda yer alan enerji kazıklarının mekanik davranışlarına olan etkisini araştırmışlardır. Analizler, enerji kazığı sisteminin ısıtma yüklerinde oluşan artışların, kazıklarında önemli miktarda gerilme ve deformasyona neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca daha yüksek mekanik ve termal yükler için, artan düzeyde bir gerilme bileşeninin topuk boyunca toprağa aktarılabilmesi görülmüştür. Yüksek mertebede termal yükler etkisinde, kazık-zemin arayüzünde plastik gerilme oluşabileceği, bu durumun ise kazık sisteminin yanıl makaslama direnci mobilizasyonunu etkileyebileceğini belirtmişlerdir.

Bach ve diğ. [37], temel olarak ısı iletkenlik, termal yayılma, özgül ısı kapasitesi ve nem içeriğinin yanı sıra sıcaklık ve yeraltı suyu özelliklerinin sığ zemin ısı sisteminin performansına etkileri üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında Avusturya, İsviçre, Almanya, İngiltere, ABD, Japonya, İran; İsveç ve Norveç'teki vaka örnekleri incelenmiş, enerji kazıklarının fayda ve kısıtlamaları özetlenmiştir.

Aralık 2000'de Japonya Sappora'da enerji kazıklarını kullanan bir bina, hem ofis hem de konut kullanımı amacıyla inşa edilmiştir. U-tipi ısı transfer boruların kullanıldığı bu sistem Hamada ve diğ. [38], tarafından hava kaynaklı bir iklimlendirme sistemiyle kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda yaygın olarak kullanılan hava kaynaklı tipik klima sistemlerine kıyasla mevsimlik enerji kazancı %23,2 düzeyine ulaştığı ifade edilmiştir.

Bir diğer çalışmada, Cervera [39], enerji kazık temellerinde zemin termal tepkisini sayısal modelleme çalışmaları yaparak incelemiş ve bu kapsamda iki farklı vakayı, hem iki boyutlu hem de üç boyutlu sayısal modeller uygulayarak değerlendirmiştir. İlk vaka incelemesi, sıg zemin ısı sistemi kullanılan bir bina için uzun vadeli-geçici (transient) analizler uygulanarak enerji kazıklı temelde çevre zeminin termal tepkisini değerlendiren bir ön çalışma olmuştur. İkinci vaka ise bir buz pateni pisti altındaki donmuş toprağın donma-erime sürecini sayısal yöntemlerden faydalananarak değerlendiren bir çalışma olmuştur. Çalışmanın sonucunda enerji kazıklarının mekanik davranışları hakkında uygulamaya yönelik bilgiler rapor edilmiş ve bu davranışların bilinmesinin, enerji kazık temellerinin boyutlandırılmasını daha kolay ve verimli hale getirebileceği belirtilmiştir.

2.1. Sıg Zemin Isı Sistemleri

2.1.1. Jeotermal Enerji

Geçen yüzyılda, dünya nüfusundaki artışa bağlı olarak ciddi miktarda artış gösteren fosil yakıtların tüketimi nedeniyle atmosferdeki karbondioksit emisyonlarında belirgin düzeyde artış olmuştur. Atmosferde birikmeye devam eden sera etkisi gösteren gazlar nedeniyle küresel ısınma meydana gelmekte ve dünya yüzeyindeki ısı dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Bilinen enerji kaynaklarının bu tempoda kullanımı azaltılamadığı sürece, iklimin dünyayı yok edebilecek düzeyde değişeceği öngörülmektedir. Bu nedenle temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunarak etkin kullanıma alınması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir. Günümüzde en çok üzerinde durulan yenilebilir enerji kaynakları güneş ve rüzgar enerjisi olmakla beraber, birçok avantaj barındırması nedeniyle jeotermal enerji de sahip olduğumuz önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir [40].

Jeotermal enerji, yerin derinliklerinde kayalar içinde birikmiş olan ısıнын sondaj kuyularına yerleştirilen ısı transfer boruları aracılığıyla yüzeye taşınarak rezervuarlarda depolanması ile oluşmuş sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisi olarak tanımlanabilmektedir. Jeotermal enerji, güneş enerjisinden sonra yeryüzünde en bol bulunan ısı kaynağıdır. Dünyanın çekirdeğinden yayılan ısı nedeniyle oluşan ısı gradyanı jeotermal enerjinin kaynağını oluşturmakta olup sınırsız kabul edilebilecek düzeydeki bu enerji efektif şekilde kullanılabilirse uzun vadede temiz enerji talebini önemli oranda karşılayabilecektir [41].

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 itibarıyla 11766 MW'tır. Yıllık elektrik üretim miktarı

ise yaklaşık 68,6 milyar kWh'tır. Türkiye konumu itibariyle, Alp-Himalaya kuşağında yer aldığından oldukça yüksek jeotermal potansiyele sahip olan bir ülkedir. Ülkemizin jeotermal potansiyeli teorik olarak 31500 MW'tır. Bu potansiyeli ulaşılabilir düzeyde barındıran alanların %79'ı Batı Anadolu'da, %8,5'i Orta Anadolu'da, %7,5'i Marmara Bölgesinde, %4,5'i Doğu Anadolu 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 [42]. Jeotermal enerjinin başlıca faydaları şunlardır:

- Jeotermal enerji kaynakları sürekli, güvenilir, sürdürülebilir ve temizdir.
- Jeotermal enerjinin maliyeti değişkenlere bağlı değildir.
- Her ülkede bir formda veya başka türde kolayca temin edilebilen büyük bir kaynak sağlar ve bu da enerji ithalatında azalmaya neden olur, bu nedenle dış ekonomik veya siyasi durumlara bağımlılığı azaltır.
- Fosil ya da nükleer yakıtlara bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olabilir.
- Elektrik, ısıtma, soğutma ve sıcak su sağlamada maliyet açısından rekabetçi olabilir.
- Kullanım çeşitliliği vardır.
- Hem elektrik üretimi hem de doğrudan kullanım uygulamaları için çok amaçlı kullanım sunabilir.
- Düşük işletme ve bakım masraflarına sahiptir.
- Jeotermal santraller için arazi gereksinimi düşüktür.
- Jeotermal sistemler altyapı gerektirmeden uzak yerlere kurulabilir; bölgede kirlilik oluşturmada geliştirilebilir.
- Jeotermal enerji diğer enerji sistemleri ile kolayca entegre edilebilir [43].

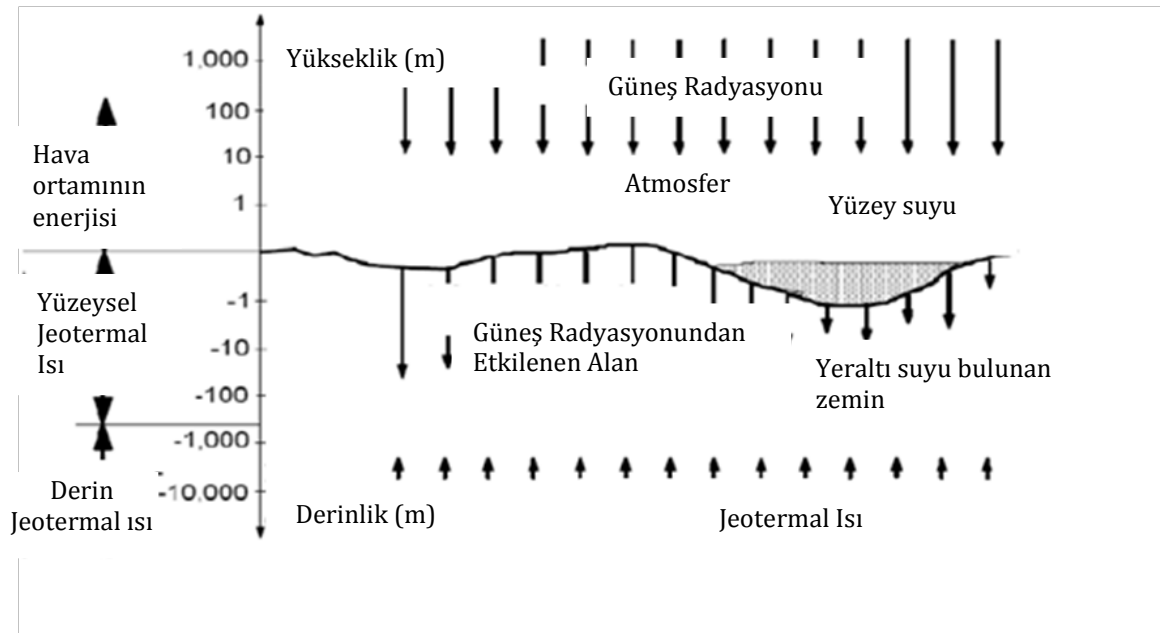
Jeotermal enerjinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre bir önemli üstünlüğü daha bulunmaktadır. Bu da rüzgâr veya güneş enerjisi gibi belli zaman dilimlerine ve belli jeolojik şartlara bağlı olmaksızın istenilen yer ve zamanda kullanılabilmesidir. Ayrıca zemin sıcaklığının belirli bir derinlikten sonra sabit kalması, diğer enerji sistemlerine göre daha kararlı bir yapı olmasını sağlamaktadır.

2.1.1.1. Jeotermal Enerjinin Sınıflandırılması

Jeotermal enerji, temel itibariyle sığ jeotermal enerji ve derin jeotermal enerji olarak sınıflandırılabilir. Yer yüzeyinin 200-300 m derinliklerine kadar elde edilebil en enerji sığ

jeotermal enerjidir, bu seviyelerin altından çıkarılabilen enerji ise derin jeotermal enerji olarak adlandırılmaktadır. Derin jeotermal enerji, yüksek sıcaklık (enerji) farkından dolayı doğrudan çıkarılabilirken, sıg jeotermal enerjide sıcaklık farkını (veya basitçe enerji farkını) kullanıma hazır hale getirmek için ısı pompaları ve eşanjör sistemleri gibi özel ekipmanlar gereklidir [40].

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi jeotermal enerji sıg ve derin jeotermal enerjinin dışında, uygulama sıcaklığına göre yüksek sıcaklık uygulamaları, orta sıcaklık uygulamaları ve düşük sıcaklık uygulamaları olarak üç kategoriye ayrılabilir.



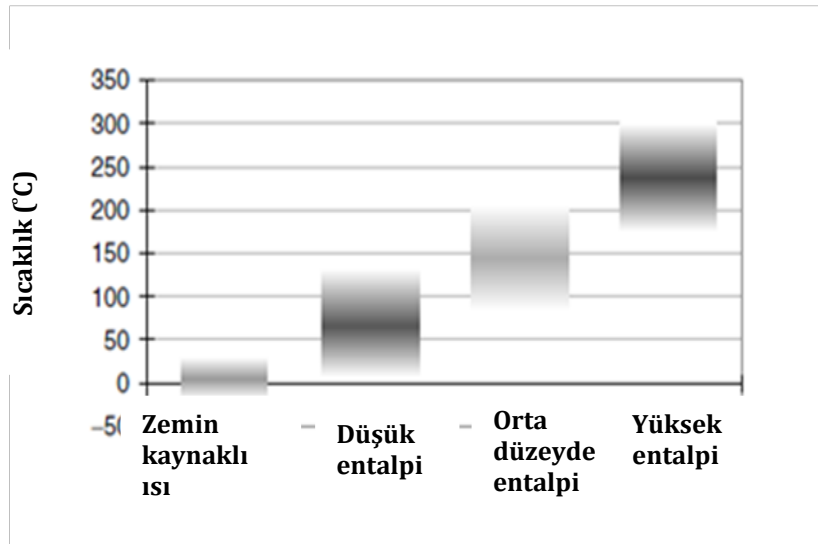
Şekil 2.1. Sığ ve Derin Jeotermal Isının Sınıflandırılması [44]

Yüksek sıcaklık uygulamaları öncelikle elektrik santralleri için kullanılır ve sistemin verimli çalışabilmesi için 150°C'den daha yüksek sıcaklıklarda akışkanın yüzeye çıkarılabilmesi gerekmektedir. Yaygın olarak jeotermal kuyulardan yüzeye çıkarılabilen akışkan sıcaklıkları 200-280°C'dedir, ve kuyu derinlikleri 1500-2500 metreye varabilmektedir. Yüksek sıcaklık rezervuarları sadece aktif volkanizma ve tektonik olaylarla birlikte büyük levha veya fay sınırlarında bulunan bölgelerde bulunur [45]. Hidrotermal kaynakların (su ve / veya buhar içeren kaynaklar) özellikleri, jeotermal enerji santralinin güç çevrimini belirler. Nadir ve coğrafi olarak sınırlı yerlerde kuru buhar üretilir ve elde edilen buhar türbinleri doğrudan çevirmek için kullanılabilir. Bununla birlikte, çoğu durumda, gereken buharı üretmek için sıcak akışkanın basıncını düşürerek buharlaşma sağlamak gerekebilir. Günümüzde mevcut jeotermal enerji üretimi dünya enerji talebinin çok küçük bir bölümünü karşılayabiliyor olsa da, birçok ülkede jeotermal kaynakların kullanımının arttırılmasına önem verilmekte ve bu konuda ayrıntılı mevzuatlar oluşturulmaktadır.

Jeotermal akışkanın dönüş sıcaklığının 40°C ile 150°C arasındaki olduğu jeotermal kaynaklar, orta ve büyük ölçekli ısıtma ve proses uygulamaları ve bazı sınırlı düzeyde güç üretimi uygulamaları için kullanılır. Bazı orta sıcaklıklı termal enerji depoları ise, içerdikleri ısı enerjisinin yüzeye aktarılmasının daha zor olduğu dağınık formda ya da ısı aktarımına izin vermeyecek tarzda jeolojik tabakalar tarafından çevrelenmiş halde bulunabilir [46].

Bu kaynaklar, bölgesel ısıtma ve tarım uygulamaları için Macaristan ve İzlanda gibi ülkelerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Alan ve bölge ısıtması arasındaki fark, alan ısıtma sistemlerinin yalnızca bir yapıya ısı sağlaması, diğer yandan bölgesel ısıtma sistemleri ortak bir kuyu sisteminden birçok yapıya hizmet etmesidir. Orta dereceli jeotermal kaynakların en fazla kullanıldığı ülkeler dünya çapında doğrudan ısı olarak kullanılan jeotermal enerjinin %68'inin tüketildiği Çin, ABD, İzlanda ve Türkiye'dir [45].

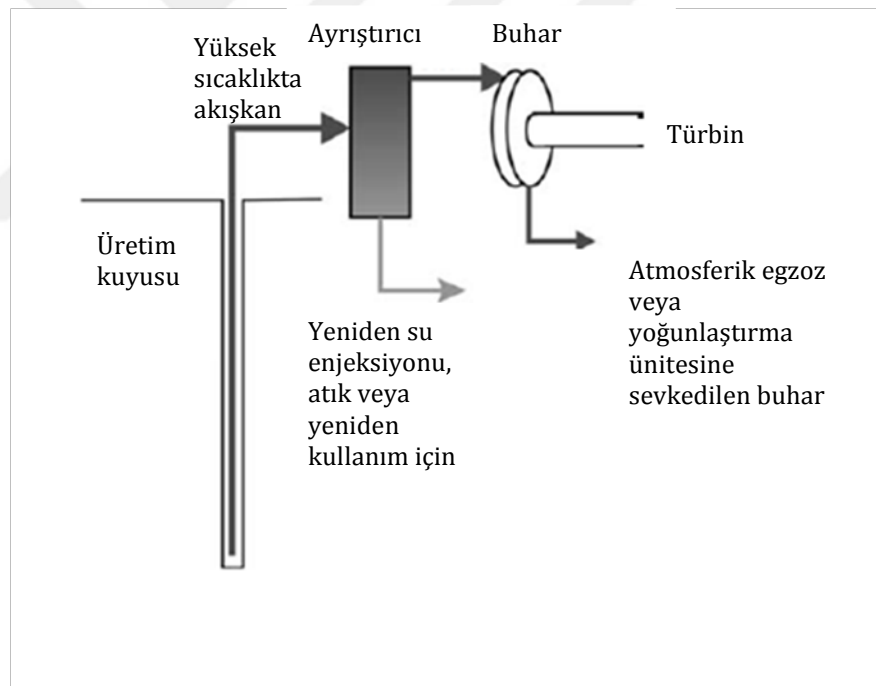
40°C'nin altındaki dönüş akışkanı sıcaklıkları için ısıtma, soğutma ve sıcak su sağlanması için yeraltı ısı kazanım sistemlerin ısı pompaları ile entegre edilerek kullanılmaktadır. Günümüzde gelişen ısı pompası ve eşanjör teknolojisi sayesinde sığ zemin ısı kazanım uygulamaları için gereken akışkan sıcaklıkları düştükçe, dünya genelinde sığ jeotermal enerjinin kullanımının mümkün olduğu alanlar hızla genişlemekte ve neredeyse her lokasyonda küçük çaplı uygulamalar için uygun hale gelmektedir. Isı kazanım sistemleri kapalı döngülerde dolaşan su bazlı bir antifriz karışımı kullanarak çalışan evaporatör-ısı eşanjörü sistemleri veya sondaj kuyularından alınan yeraltı suyunun doğrudan kullanılarak ısı pompası aracılığıyla enerji elde edildiği açık döngü sistemleri olabilir. Açık döngü sistemleri en yüksek enerji verimi sağlarken, en yüksek finansal girişi gerektirir ve beraberinde en yüksek teknik riskleri getirirler [47].



Şekil 2.2. Jeotermal sistemlerin sıcaklığa göre sınıflandırılması [48]

Yapılan başka bir çalışmaya göre ise, Şekil 2.2’de belirtilen sınıflandırmanın yerine, jeotermal sistemlerin kullanım potansiyellerine veya ürettikleri akışkanların özelliklerine göre sınıflandırılmasının daha doğru bir yaklaşım olduğu ifade edilmiştir [48]. Çalışmaya göre kullanım potansiyellerine göre jeotermal sistemler; buhar türbinleri, ikili sistemler, doğrudan kullanım, basamaklı kullanım ve geliştirilmiş jeotermal sistemler olarak sınıflara ayrılabilir.

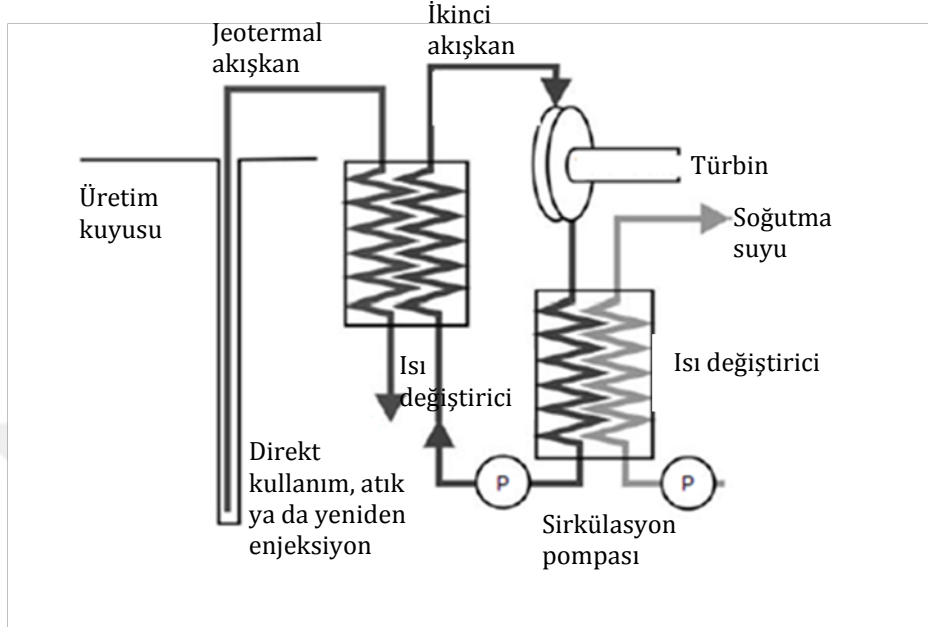
Bilindiği üzere jeotermal enerjinin elektrik üretiminde kullanılabilmesi için buhar türbinlerinden faydalanılmaktadır. Genel itibariyle 150°C üzerindeki akışkan sıcaklıklarını kararlı bir şekilde üretebilen jeotermal sistemlerle buhar türbinlerini entegre etmek verimli olabilmektedir. Su ve buhar veya ıslak buhar karışımlarını üreten bu tip sistemlerde su bileşenini buhardan uzaklaştırmak için bir ısı kazanım sistemine ayırıcı olarak adlandırılan bir elemanın eklenmesi gerekebilmektedir (Şekil 2.3). Türbinin verimliliği, türbinin içinden geçtikten sonra buharı yoğunlaştırmak için yoğunlaştırma birimi kullanarak artırılabilir [1].



Şekil 2.3. Yüksek sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın buhar türbinine güç vermek için kullanılması [1]

Buhar türbinlerinin kullanılması için gerekli olan sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklarda da, jeotermal akışkanlardan elektrik üretmek mümkündür. Ancak konvansiyonel yöntemden farklı olarak, bu sistemlerde su buharının doğrudan doğruya akışkan sıvı olarak kullanılması gerekli değildir (Şekil 2.4). İkili sistemlerde, ısı enerjisini daha düşük bir buharlaşma sıcaklığı olan bir ikincil sıvıya aktarmak için bir ısı eşanjörü kullanılır. Uçucu hale gelen bu ikincil akışkan, üretim yapan bir türbinin dönmesini sağlamaktadır. İkili sistemler,

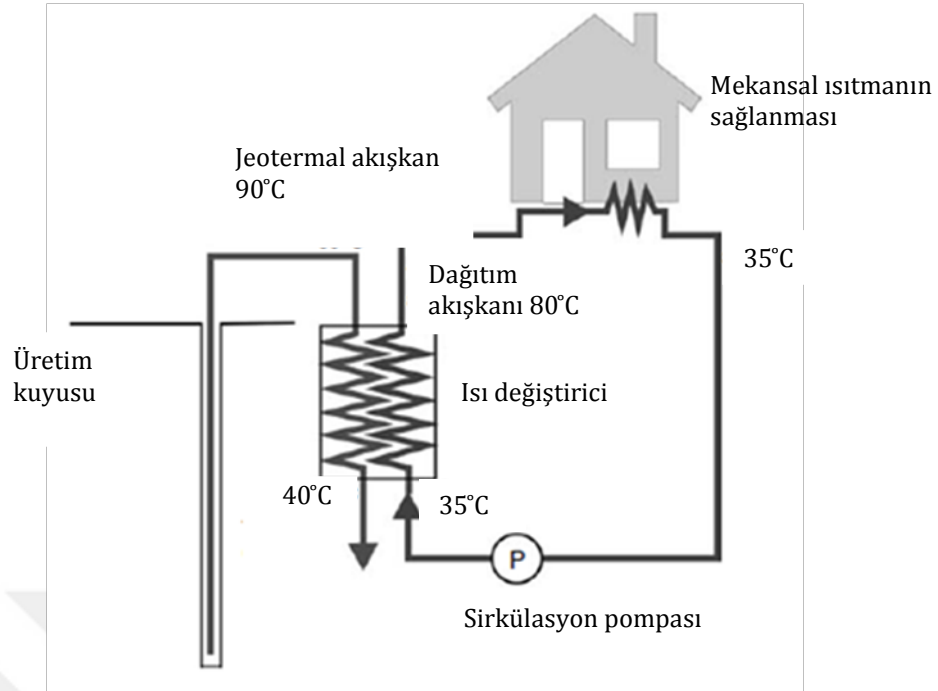
85°C'ye kadar (veya teorik olarak daha da düşük) sıcaklıktaki jeotermal akışkanlardan bile elektrik üretebilir [49].



Şekil 2.4. Orta derecede sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın ikili sisteme güç vermek için kullanımı [1]

Genellikle, düşük sıcaklıktaki jeotermal sıvı, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, bir ısı eşanjörü vasıtasıyla aşağıda belirtilen alanlarda kullanılır:

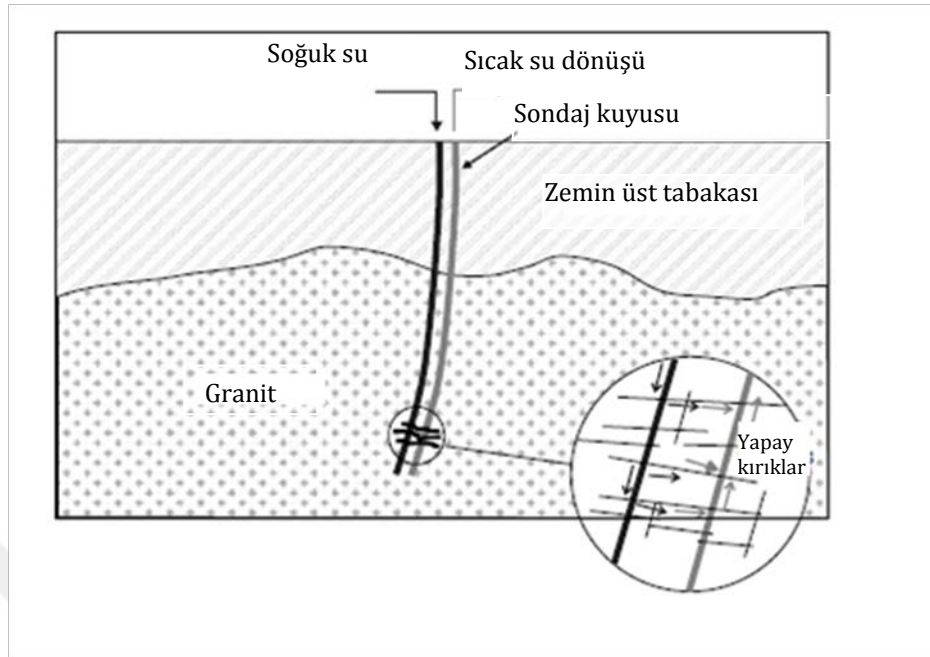
- Yerden ısıtma
- Endüstriyel kullanımlar
- Yüzme havuzları
- Tarım ve su ürünleri yetiştiriciliği.



Şekil 2.5. Düşük sıcaklığa sahip jeotermal akışkanın yerden ısıtma sağlamak için doğrudan kullanımı [1]

Birçok jeotermal sistemin enerjisi, yalnızca tek aşamada değil, ardışık "kademeli" uygulamalar vasıtasıyla çıkarılabilmektedir [50]. Yüksek buhar içeriğine sahip, yüksek entropili bir jeotermal sistemde, iki aşamada enerji kazanımı gerçekleştirilebilir. Öncelikle birinci basamak olarak türbin vasıtasıyla jeotermal enerji değerlendirilebilmektedir. Bundan sonra, türbinlerden çıkan 'atık' buhardaki ısı içeriği, ısı eşanjörleri vasıtasıyla direkt olarak kullanılabilecek ikincil bir ısı transfer sıvısına aktarılabilir. Örnek verecek olursak birinci aşama jeotermal sistem yüksek sıcaklıkta buhara ihtiyaç duyan elektrik üretimi ya da bir başka endüstriyel uygulama için enerji sağlayabilir, enerji içeriğini belirli oranda kaybeden ısı transfer sıvısı ikinci aşamada daha düşük sıcaklık talebi olan mekanal ısıtma amaçları için değerlendirilebilir.

Genel olarak jeotermal enerji kullanımlarında, bir jeotermal rezervuardan elde edilebilecek ve kullanılabilecek jeotermal akışkanın (su ve/veya buhar) varlığı sürdürülebilir olmalıdır. Bununla birlikte, bazı jeotermal rezervuarların geçirgenliği oldukça düşüktür ve büyük miktarda doğal akışkan çıkarılamamaktadır. Bu tip rezervuarlar genellikle, yüksek yoğunlukta uranyum, potasyum ve toryum radyoaktif izotopları içeren yüksek sıcaklıkta kayalarından müteşekkil olup ortalama ısı akışığı doğal jeotermal gradyandan daha yüksek bir orana sahip olabileceğinden jeotermal potansiyel açısından oldukça caziptir (Şekil 2.6.).



Şekil 2.6. Sıcak kayalardan jeotermal enerji üretimi [1]

2.1.1.2. Jeotermal Enerjinin Sürdürülebilirliği ve Çevresel Etkileri

Herhangi bir doğal kaynağın kullanımında sürdürülebilirliği tartışırken, öncelikle sürdürülebilir sözcüğünün içeriği konusunda net sınırlar oluşturmak ve ikinci olarak, enerjinin üretilmesi ve kullanımda kalması planlanan zaman ölçeği hakkında net bir bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bazı araştırmacılar, jeotermal sistemleri tanımlayabilmek için karmaşık bir ifade ortaya koymaktadır [51]. Bahsedilen tanımlamaya göre her bir jeotermal sistem için ve üretim modu için, belirli bir seviyede azami enerji üretimi (E_0) vardır; bu seviyenin altında, sistemden çok uzun vadede (100-300 yıl) sabit enerji üretimini sağlamak mümkün olacaktır. Ancak üretim oranı E_0 eşik değerinden büyükse bu süre boyunca enerji üretimi muhafaza edilemeyecektir. E_0 değerinden daha düşük ya da E_0 değerine eşit olan jeotermal enerji üretimi sürdürülebilir üretim olarak adlandırılırken, E_0 'dan daha fazla üretim aşırı üretim olarak adlandırılır ve sürdürülebilir sayılamaz. Jeotermal bir sistemin kullanım sürecinde sürdürülemezliği, aşağıdaki şekillerde ortaya çıkabilir:

- Sistemin sıcaklığı kullanılmayan bir seviyeye düşebilir,
- Jeotermal akışkan (su veya buhar) verimli kullanılmayacak düzeyde azalabilir.

Bu nedenle, jeotermal bir operasyonun sürdürülebilirliğini değerlendirmek için, hem ısı bütçesi hem de sistemin su bütçesi ve bu sistemlerin sınır koşulları hakkında çok net bilgiye sahip olunması gerekir. Isı bütçesi oluşturulurken, birçok jeotermal sistemde, yeraltı jeotermal

sistemine ısı yüklemesi yapan mekanizmaların en az iki ve belki de üç tane olduğu hatırlanmalıdır [51]. Bu mekanizmalar aşağıda sıralanmaktadır:

- Magmatik konveksiyon,
- Yeraltı sularının (veya jeotermal akışkan) taşınması,
- Isı iletimi

Sürdürülebilirlik konusu değerlendirilirken, zaman ölçeğini göz önünde bulundurmak gerekir. Bir rezervuar (yani coğrafi ve hidrojeolojik açıdan ilgili ekstraksiyon ve enjeksiyon kuyuları kümesi) on yıllar veya yüzyıllar gibi limitli bir ömre sahip olmasına rağmen, dünyanın tektonik ve ısı akışı süreçleri milyonlarca yıllık bir zaman ölçeğine sahiptir. Örnek vermek gerekirse, 100 yıl gibi bir süreçten sonra jeotermal bir saha verim yetersizliği ve sürdürülebilir olmadığı için terk edilmek zorunda kalırsa bile, yerkürenin çekirdeğinden yayılmakta olan ısı varlığını sürdürür. Isı iletimi, magmatik konveksiyon ve yeraltı suyu konveksiyonu ısı sağlamaya devam eder ve terkedilmiş jeotermal sahanın nihayetinde, üretim ömrüne benzer bir zaman ölçeğinde, kullanım öncesi sıcaklıklarına ulaşması beklenebilir. Örneğin; İzlanda gibi jeolojik olarak aktif bir ülkede, ısı ve jeotermal akışkanların kaynaklarının tam olarak bilinmesi ve planlanması yoluyla, jeotermal enerji üzerine kurulu bir ulusal enerji politikası süresiz olarak ülkenin enerji ihtiyacını sağlamak üzere sürdürülebilir.

Sürdürülebilirlik konusunda bir diğer tartışma da kirlenme ve çevresel etki kavramına bağlıdır. Jeotermal enerji santralleri ve bunlardan faydalanan bölgesel ısıtma sistemleri birçok olumlu etkinin yanında, bir takım olumsuz çevresel etkilere de sahip olabilir. Bazı araştırmacılar, bu konuyu detaylı bir şekilde araştırmaktadır. Çalışmalardan elde edilen bulgular birkaç ana madde halinde sıralanabilir:

- a. Gürültü: Üretim kuyuları ve türbinlerden çevreye gürültü yayılabilir, bu durum sondaj işlemleri ve test aşamasında muhtemelen daha belirgindir.
- b. Koku: Jeotermal kuyulardan açığa çıkan hidrojen sülfür gibi gazlar rahatsızlık verici seviyelere çıkabilir.
- c. Üretilen jeotermal akışkanlardan çıkan CO₂ gibi gazlar da dahil olmak üzere diğer gazların emisyonları: Jeotermal operasyonlardaki CO₂ emisyonu, kWh başına 0.12 kg CO₂ olmakla beraber bu değer geleneksel yöntemlerle elektrik üretiminden çok daha azdır.
- d. Subsidence ve mikro-sismisite (özellikle kuyulardan çekilen akışkanların yerine geri enjekte edilmemesi durumunda ortaya çıkmaktadır). Konut ve yapılara zarar verebilir.
- e. Tuzlu atık sular: Bunlar yeniden enjekte edilerek veya denize dökülerek bertaraf edilebilir [49].

2.2. Sığ Zemin Tabakalarından Jeotermal Enerjinin Elde Edilmesi

Yapı ve konutlarımızı üzerine inşa ettiğimiz sığ zeminler aynı zamanda büyük bir ısı deposu olarak kabul edilebilir. Yaz boyunca güneş enerjisiyle ısınan sığ toprak ve kayaların depoladıkları ısı enerjisini kış aylarında uygun yöntemlerle kullanıma açmak mümkün olabilir. Yeryüzünde bulunan çoğu kayalar silikat bazlıdır ve ısı depolamada büyük potansiyele sahiptirler. Silikat yoğunluğu yüksek kayaların ısıl iletkenliği ortalama seviyelerde olup ısı değiştiricilerle zeminden çıkarılmaya imkan verecek düzeydedir.

Yer yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 100 m derinliklere kadar devam eden sığ zemin ve kayalar, termal enerjinin depolanması ve üretimi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Mevsimlere göre ortaya çıkan iklimsel sıcaklık değişimi, yüzeyden itibaren yaklaşık 15 metre derinliğe kadar etkili olabilmekte, bu seviyeden itibaren mevsimsel etkilerden bağımsız olarak sabit bir sıcaklığa sahip olmaktadır. Yaklaşık 100 metre derinliklerden itibaren kaya sıcaklıkları, jeotermal gradyana göre şekil almakta ve her 100 m derinlik için ortalama 3°C düzeyinde artış sergilemektedir. Sığ zemin sıcaklıklarının yaklaşık 15 metre derinlikten sonra sabit kalması, sığ zeminlerden enerji elde edilmesini kolaylaştırmakta ve enerji elde etmek için kullanılan sistemlerin verimliliğini artırmaktadır [1].

2.3. Isı Transfer Mekanizmaları

Isı transferi, bir sistemin çevresi ile arasındaki termal enerjinin alışverişinden sorumlu mekanizmalarla aktarıldığı termodinamik bir süreçtir. Bir ortamda veya ortamlar arasında sıcaklık farkı olduğunda, ısı aktarımı meydana gelir [52]. Isı transferi, iki ana unsur olan sıcaklık ve ısı akışının ölçülmesi ve hesaplanmasını içerir. Sıcaklık, bir sistemdeki termal enerjinin miktarını temsil ederken, ısı akışı, termal enerjinin hareketini temsil eder [53].

Bazı araştırmacılar, zemin yüzeyinde gerçekleşen ısı transferini etkileyen faktörler olarak şunları sıralamıştır [54]:

a. İklimsel faktörler: İklimin yıllık değişimleri zemin yüzey sıcaklığını etkiler. 10-15 metre altındaki derinliklerde iklim etkisi önemsizdir ve sıcaklık yıl boyunca sabit kalır. İklim faktörlerinden bazıları şunlardır:

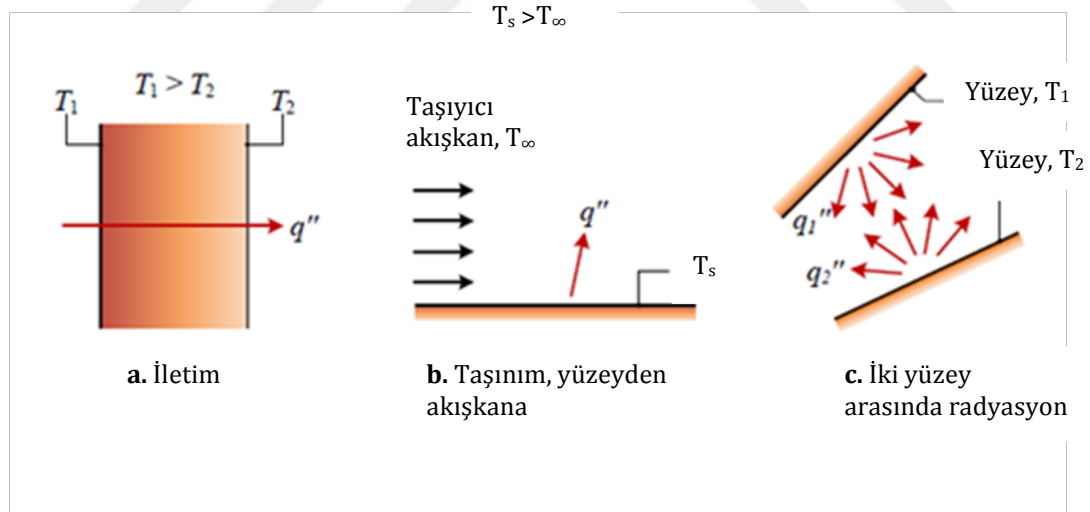
- Yüzey radyasyonu
- Sıcaklık
- Konvektif ısı akışı
- Buharlaşma ve yoğunlaşma
- Toprak içine ve dışına termal akım

- Donma/çözülme döngüleri: Soğuk bölgelerde mevsimsel değişiklikler nedeniyle donma ve çözülme döngüleri, toprak koşullarını, özelliklerini ve davranışlarını değiştirmektedir. Don derinliği aşağıdaki faktörlerden etkilenebilir:
 - Hava sıcaklıkları
 - Yağış
 - Rüzgar hızı

Isı, Şekil 2.7’de ifade edildiği üzere üç ana mekanizma ile aktarılmaktadır [55]. Bu mekanizmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- İletim,
- konveksiyon (taşıma),
- radyasyon.

Sığ yeraltı ortamlarında, mineraller veya gözenekli sıvılar ile iletim ve yeraltı suları yoluyla taşıma muhtemelen ısı akışının en önemli iki mekanizmasıdır. Bazı durumlarda, radyasyon da önemli olabilir, o nedenle göz önünde bulundurulması gerekir.



Şekil 2.7. Isı transfer mekanizmaları [52]

2.3.1. Isı İletimi

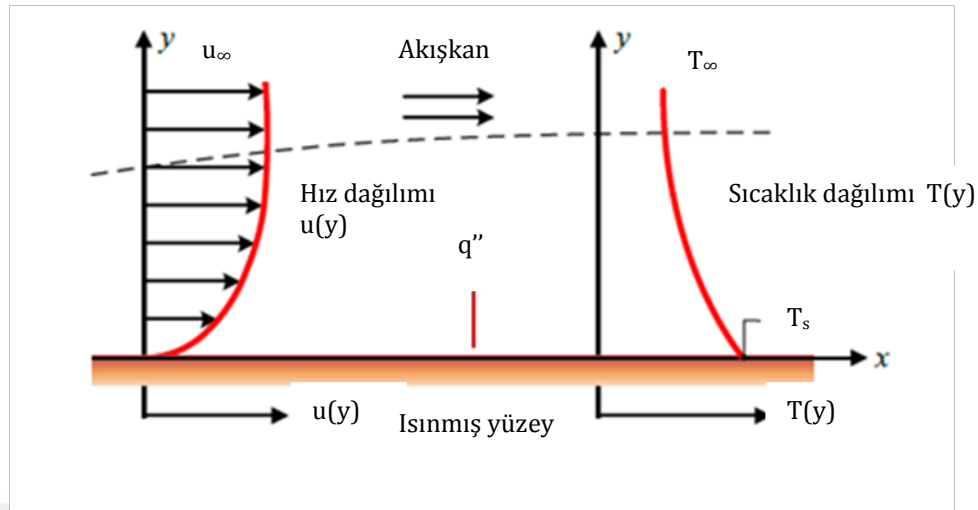
Isı iletimi, aynı zamanda ısı difüzyonu olarak da adlandırılmakta olup termal enerji akışının en önemli modlarından biridir. Termodinamiğin ikinci yasası gereği, farklı sıcaklıktaki iki cisim ısıyla temas ettiğinde, termal enerji her zaman yüksek sıcaklıktaki cisimden daha düşük sıcaklığa sahip cisim yönünde akar. İki bölge arasındaki ısı akışı, termal denge olarak bilinen bir sıcaklığa ulaşınca kadar devam eder.

Bilindiği üzere her madde farklı bir ısı iletkenlik değerine sahiptir. Örneğin; bakır çok iyi iletken, kayalar bakıra nazaran çok daha az iletken. Benzer şekilde plastikler genellikle zayıf iletkenlerdir. Kayaçların ve diğer jeolojik materyallerin termal iletkenlikleri tipik olarak 1 ile 3 Wm⁻¹K⁻¹ arasında değişen oldukça dar bir aralık içerisinde yer alır. Yaygın kaya oluşturan minerallerin arasında, kuvars, 7 Wm⁻¹K⁻¹ civarında en yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Dolayısıyla, kayaçların ve sedimanların ısı iletkenliği, genel itibarıyla kuvars içeriğine bağlıdır [55].

2.3.2. Isı Taşınımı (Konveksiyon)

Isı taşınımı, akışkan hareketiyle ilişkilendirilen ısı transferinin önemli bir modudur. Başka bir deyişle, sıcaklık farkından dolayı bir sistem sınırı boyunca, moleküller arası etkileşimlerin ve moleküllerin toplu hareketinin birleşmesi sonucu oluşan mekanizmalar tarafından gerçekleştirilen enerji transferidir. Rastgele moleküler hareketten (difüzyon) kaynaklanan enerji transferine ek olarak, enerji, sıvının toplu veya makroskopik hareketi (advection) tarafından da aktarılır [52].

Konveksiyon ısı transferi, hareket halindeki bir sıvı ile sınırlayıcı bir yüzey arasında, farklı sıcaklıklar olması durumunda gerçekleşir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Konveksiyon ısı transferinde sınır tabakasının gelişimi [52]

2.3.3. Radyasyon

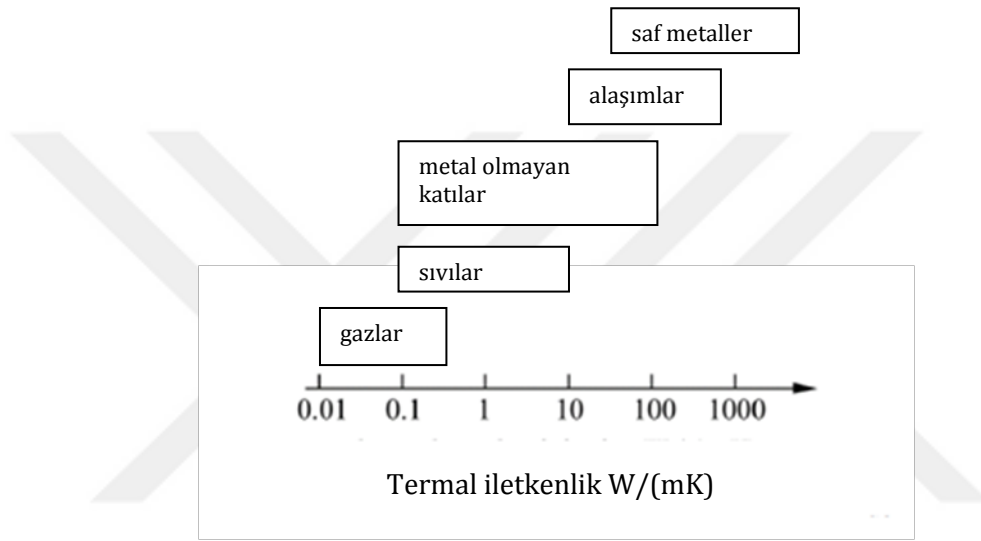
Atom ve moleküllerin elektronik düzenlerindeki değişimler sonucu elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan ısı transfer biçimidir. Bu ısı transferi için, cisimlerin arasında konveksiyon ya da iletken ısı transferi gibi fiziksel maddenin bulunması gerekli değildir. Sıcaklığı sıfırdan farklı olan her madde termal radyasyonla enerji yayar. Bütün katılar, sıvılar ve gazlar, termal ışıınımı değişik oranlarda yayar, soğurur veya geçirirler. Termal radyasyonun dalga boyları 0,1-100 mikrometre arasında değişir [39]. Sığ zeminlerde radyasyon kaynaklı ısı transferinin etkisi genellikle ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmektedir.

2.4. Isı Transfer Parametreleri

Oldukça kompleks mekanizmalar tarafından yönetilen ısı transferi bir takım yaklaşımlarla idealize edilebilmektedir. Bu davranışın idealize edilebilmesi için ısı transferine doğrudan etkisi olan birkaç termal parametre mevcuttur. Bu parametreler aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

2.4.1. Termal İletkenlik

Termal iletkenlik, bir malzemenin ısı iletme yeteneğini açıklayan temel termal özelliktir. Fourier kanununa göre; termal iletkenlik sabit koşullarda bir birim sıcaklık gradyanına bağlı olarak birim yüzey alanına normal yönde bir birim kalınlık boyunca iletilen ısı miktarı olarak tanımlanır. İletkenliğin fiziksel temeli moleküler ve atomik seviyelerde ele alınmalıdır. Katılar genelde en yüksek iletkenliğe sahiptirler, sıvı ve gazlar Şekil 2.9'da görüldüğü üzere katıları takip ederler [56].



Şekil 2.9. Çeşitli maddelerin yaklaşık termal iletkenlik oranları [56]

2.4.2. Özgül Isı Kapasitesi (c)

Özgül ısı kapasitesi (ölgül termal kapasite, c), bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığının birim sıcaklık derecesi değıştirilmesi için gereken ısı miktarını tanımlar. Benzer şekilde birim kütle (m) başına aktarılan ısı enerjisi miktarının (Q), sıcaklık değışimine (Δt) oranı olarak da tanımlanmakta olup Eşitlik (2.1)'de ifade edilmektedir.

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad (2.1)$$

Termodinamikte, c_p sabit basınçtaki ölgül ısıyı ve c_v kısaltması ise sabit hacimdeki ölgül ısıyı tanımlamak için kullanılmaktadır. Katılar ve sıvılar gibi sıkıştırılmaz malzemeler için, her iki özellik temel olarak eşittir. Ölgül ısı kapasitesi sıcaklık ile değışmektedir. Bununla birlikte, ısı değıştirici sistemlerde çalışma sıcaklık aralığı nispeten küçük ise, sabit olarak kabul

edilebilir. Örneğin, sabit bir atmosferik basınçta, 0° C ile 100° C arasında değişen bir sıcaklık için suyun özgül ısı değeri yalnızca %1'lik bir oranda değişmektedir [53].

2.4.3. Hacimsel Isı Kapasitesi

Hacimsel ısı kapasitesi, özgül ısının kütle yoğunluğuyla çarpılmasıyla elde edilir. Çok fazlı bir malzeme olması durumunda hacimsel ısı kapasitesi, bölgesel hacim ortalamasını kullanarak hesaplanabilir. İki fazlı bir gözenekli malzeme için, bazı araştırmacılar tarafından verilen ifadeye göre [53-57]:

$$(pc_p)_{eff} = n(pc_p)_f + (1 - n)(pc_p)_s \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de porozite n harfi ile, özgül ısı kapasitesi c ile, kütle yoğunluğu ise p harfi ile ifade edilirken eşitlikte kullanılan eff, f ve s indisleri ise sırasıyla ortalama değer, sıvı faz ve katı fazı temsil etmektedir.

Bazı maddelerin termal iletkenlik ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Bazı maddelerin termal iletkenlik ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri [1]

Kayaçlar ve Tortullar	Termal iletkenlik (Wm⁻¹K⁻¹)	Hacimsel ısı kapasitesi (MJ m⁻³K⁻¹)
Kömür	0,3	1,8
Kalker	1,5-3,0	1,9-2,4
Şist	1,5-3,5	2,3
Islak kil	0,9-2,2	2,4
Bazalt	1,3-2,3	2,4-2,6
Diyorit	1,7-3,0	2,9-3,3
Kumtaşı	2,0-6,5	2,0-2,1
Gnays	2,5-4,5	2,1-2,6
Arkoz	2,3-3,7	2,0
Granit	3,0-4,0	1,6-3,1
Kuvarsit	5,5-7,5	1,9-2,7
Diğerleri		
Hava	0,024	1,29×10 ⁻³ (1 atm'de)
Cam	0,8-1,3	1,6-1,9
Beton	0,8	1,8
Buz	1,7-2,0	1,9
Su	0,6	4,18
Bakır	390	3,5
Meşe	0,1-0,4	1,4
Polipropen	0,17-0,20	1,7
Polistren köpüğü	0,035	-

Hacimsel ısı kapasitesi, sıcaklığa bağlı olarak önemli oranda değişmemekle birlikte, sıcaklığa bağlı olarak malzeme yoğunluğundaki değişimlere bağlı olarak az miktarda değişim sergileyebilmektedir.

2.4.4. Faz Değiştirme Isısı

Isı enerjisinin bir bölümü basit bir şekilde maddelerin fazlarının bir özelliği olarak da depo edilebilmektedir. Örneğin; 100°C'deki buhar, aynı sıcaklıktaki suya göre çok daha fazla enerjiye sahiptir. Sıvı fazdaki bir maddeyi gaz fazına dönüştürmek için sıcaklığı yükseltmeden bir miktar enerji enjekte etmek yeterlidir. Su - buhar geçişinde bahsedilen faz değiştirme ısı 2,272 MJkg⁻¹ 'dir. Akışkanların buharlaşma ve yoğunlaşma çevrimleri sırasında çevreden ısı alınması ve çevreye ısı aktarılması klima ve ısı pompalarının temelindeki sıkıştırma-genleşme döngüsünü işlevsel hale getiren önemli bir özelliktir. Benzer şekilde, katı fazdaki bir madde, sıvı faza dönüştürüldüğünde, herhangi bir sıcaklık artışı olmadan faz geçişini gerçekleştirmek için bir ısı alımına ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek vermek gerekirse 0°C'deki buz 0°C'de suya dönüştürmek için 333,5 kJkg⁻¹ faz değiştirme ısı gerekir [1].

Bazı temel maddelerin ve zeminlerin ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve faz değiştirme ısıları değerleri Tablo 2.2' de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli maddelerin termal özellikleri [58]

Malzeme	Isı Kapasitesi (kJ/m ³ .K)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Faz Değiştirme Isısı(kJ/m ³)
Hava (20° C)	1,297	0,026	-
Su (0° C)	4,16x10 ³	0,56	333,5x10 ³
Buz (0° C)	2,20x10 ³	2,21	333,5x10 ³
Kil	3,0-3,6x10 ³	0,85-1,4	1,1,-2,5x10 ⁵
Siltli Kil	2,9-3,3x10 ³	1,1-1,6	1,5-2,0x10 ⁵
Silt	2,4-3,3x10 ³	1,2-2,4	0,8-2,0x10 ⁵
Kum	2,5-3,3x10 ³	1,5-2,6	0,8-1,7x10 ⁵

2.4.5. Termal Yayılma Oranı (α)

Termal yayılma oranı, malzemenin hacimsel ısı kapasitesine göre termal iletkenlik oranını ifade eder ve şu şekilde tanımlanır:

$$\alpha = \frac{k}{(\rho c_p)} \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te k, ρ ve c_p sırasıyla termal iletkenlik değeri, kütle yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi' ni tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, ısı yayılımı yüksek malzemelerde ısı daha

hızlı hareket eder ve ısıları hacimsel ısı kapasitelerine göre hızlı bir şekilde iletiğinden sıcaklıklarını çevrelerine daha hızla yayarlar [55].

2.4.6. Jeotermal Gradyan

Yer sıcaklığının derinlikle artma hızına jeotermal gradyan denir. Normal yerkabuğu şartlarında her 33 m'de sıcaklık 1°C artar. Volkanik olmayan bölgelerde jeotermal gradyan ortalama olarak 100 metre derinlik için 2°C - 3°C veya kilometre başına yaklaşık 30°C dir. Fakat bu ortalama bir değer olup jeotermal radyan konuma bağlı olarak farklılık göstererek 100 m derinlik için 1°C 'den daha küçük veya 5°C 'den daha büyük değerler alabilmektedir. Buna ilave olarak kayaçların ısı iletkenliği, mineralojik bileşimine, gözenekliliğine, geçirgenliğine, su ve gazı doygunluğuna bağlıdır. Yeraltında ısı iletkenliği düşük kayaçlar örtü etkisi yaparak bölgesel jeotermal gradyanın artmasına neden olur [1].

2.5. Isı Pompası Sistemleri

Isı pompaları, ısı enerjisinin düşük sıcaklıklı bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama doğru hareket ettirilebilmesi amacıyla kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde enerji aktarımının gerçekleştirilebilmesi için sistem bünyesinde gerçekleşen mekanik iş nedeniyle enerji harcanmaktadır. Isı pompaları, kaynak ortamdaki mevcut ısıyı istenilen amaç doğrultusunda kullanılabilir bir seviyeye yükseltir.

Gelişen teknolojiyle birlikte ısı pompası tasarımında ciddi düzeyde yenilikler yapılmakta olup bu sistemlerin enerji verimliliği yükselmektedir. Bu doğrultuda ısı pompası sistemlerine olan talep günden güne artmaktadır. Bina ve konutların ısıtılması için kullanılan bir ısı pompasının çalışma mekanizması, çalışma basınçları ve buharlaşma/yoğunlaşma sıcaklıkları farklı olabilmesine rağmen bir buzdolabı ya da klima ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Isı pompalarında kullanılan ve ısı transferini sağlayan akışkanın birçok türü olabilir. Ancak, ortak özellik olarak termal olarak kararlı olmalı, uygun bir özgül ısı kapasitesine sahip olmalı, ısı pompasının çalışma sıcaklığına ve basıncına göre ayarlanmış bir kaynama noktasına sahip ve çevre dostu olmalıdır. John Sumner öncü Norwich Isı Pompası sisteminde [59] kaynama noktası 1,497 atm basınç altında -1°C olan olan kükürt dioksit (SO₂) gazı kullanmıştır. Tasarlanan ısı pompası sistemi kış mevsiminde hemen hemen donmuş durumda bulunan nehri suyunda enerji almak üzere optimize edilmiştir.

2.5.1. Isı Pompalarının Verimliliği

Bir ısı pompasının verimi, θ_1 ve θ_2 ifadeleri sırasıyla pompa çıkış ve giriş sıcaklıklarını ifade etmek üzere üretilen ısı miktarının (H), kompresör tarafından sıkıştırma sürecinde yapılan işe oranı (W) olarak tanımlanır. Teorik olarak ısı pompasının maksimum verimliliği ideal Carnot döngüsüyle [60]:

$$E_{max} = \frac{H}{W} = \frac{\theta_1}{(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.4)$$

İfade edilmektedir.

Modern ısı pompalarında, kompresör elemanı genellikle elektrik motoru ile çalıştırılmaktadır, bu nedenle Eşitlik (2.4)'te W teriminin yerini E (elektrik enerjisi) alır. Isı pompasının verimliliği genellikle performans katsayısı (COP) olarak adlandırılır ve Eşitlik (2.5)'te gösterildiği şekilde:

$$COP = \frac{H}{E} \quad (2.5)$$

ifadesi elde edilir. Tablo 2.3'te kış mevsiminde konvansiyonel kalorifer yakıtı ile çalışan ısıtma sistemi kullanan bir binanın kışlık enerji bütçesi ile aynı binanın toprak kaynaklı ısı pompası kullanan yenilikçi bir sisteme geçmesi durumundaki enerji bütçesi kıyaslanmaktadır. Tablodan görüldüğü üzere toprak kaynaklı ısı pompasının COP değerinin ısıtma durumunda konvansiyonel sisteme göre yaklaşık 4,7 kat daha verimli olduğu, ısıtma enerji maliyeti açısından da yaklaşık %9 düzeyinde daha karlı olduğu görülmüştür. Tablo 2.4' te ise her iki sistemin yazlık enerji bütçeleri kıyaslanmıştır. Görüldüğü üzere soğutma durumunda toprak kaynaklı ısı sistemi standart merkezi soğutma sisteme göre 3,75 kat daha yüksek COP değerine sahiptir. Soğutma amaçlı kullanım maliyeti açısından kıyaslandığında toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin merkezi soğutma sistemine göre %48 mertebesinde daha karlı olduğu görülmektedir. Yazlık ve kışlık kullanım için ortalama durum göz önüne alındığında ise toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin %36 mertebesinde daha düşük maliyetli iklimlendirme sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 2.3. Kıyaslanan iki sistemin ısıtma modunda enerji maliyetleri [61]

ISITMADA	Toprak Kaynaklı Isı Pompası	Kalorifer Yakıtı ve Merkezi Klima Sistemi
Binanın ısıtma yükü	259 kW	
Yıllık ısıtma süresi	900 s	
Yıllık ısıtma enerjisi	259x900=233100 kWh	
Isıtma yakıtı (enerjisi)	Elektrik	Kalorifer yakıtı
Isıl değer	1 kWh/ kWh	13,95 kWh/ kg
COP	3,75	0,8
Birim Fiyat	0,067445 TL/kWh	0,2214 TL/ kWh
Gerçek Fiyat (TL/kWh)	0,017985	0,019839
Yakıt (enerji) Tüketimi	62160 kWh	20887 kg
A= Isıtma için enerji maliyeti	4 192,381 TL	4 624,381 TL

Tablo 2.4. Kıyaslanan iki sistemin soğutma modunda enerji maliyetleri [61]

SOĞUTMADA	Toprak Kaynaklı Isı Pompası	Kalorifer Yakıtı ve Merkezi Klima Sistemi
Binanın soğutma yükü		294 kW
Yıllık soğutma süresi		1080 s
Yıllık soğutma enerjisi		294x1080=317520 kWh
Soğutma yakıtı (enerjisi)	Elektrik	Kalorifer yakıtı
Isıl değer	1 kWh/ kWh	1 kWh/ kWh
COP	3,75	1
Birim Fiyat	0,067445 TL/kWh	0,067445 TL/ kWh
Gerçek Fiyat (TL/kWh)	0,017985	0,067445
Yakıt (enerji) Tüketimi	84672 kWh	162000 kWh
B= Soğutma için enerji maliyeti	5 710,703 TL	10 962,090 TL
Toplam (C=A+B)	9 903,084 TL	15 550,471 TL

2.5.2. Sığ Zemin Kaynaklı Isı Pompaları

Sığ zemin kaynaklı ısı pompaları, kaynak ortam olarak sığ zeminleri veya zemine termal olarak bağlanmış diğer yapıları kullanan ısı pompası sistemleridir. Zeminle arasındaki ısı transferinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, sığ zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinin optimum tasarımı için önem arz etmektedir. Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı için sığ zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinin davranışını belirlemek üzere analitik veya sayısal yöntemlere dayanan birçok yaklaşım önerilmiştir. Analitik çözümlere dayalı en basit teorik yaklaşım olarak sonsuz çizgi kaynak modeli ve sonsuz silindirik kaynak modeli değerlendirilmektedir. Bu analitik çözümler zemini sonsuz bir ortam olarak görmekte ve ısı

transferini sağlayan ortamı ise kuyu eksenine dik doğrultuda tek boyutlu bir iletken olarak basitleştirmektedir [62].

Sığ zemin kaynaklı ısı pompalarının yüksek verimlilik sağladığını ortaya koyan verilere rağmen, nispeten yüksek kurulum maliyetleri, diğer enerji teknolojilerine göre daha az miktarda uygulama oranına sahip olmasına neden olmuştur. Sığ zemin kaynaklı ısı pompalarının yüksek kurulum maliyeti düşüncesini bertaraf edebilmek için, bina üstyapı yüklerini zemine aktarmak için kullanmak zorunda olduğumuz ve sığ zeminle temas halinde olan radye temel, kazıklı temel, istinat duvarı gibi mevcut yapısal elemanları aynı zamanda ısı transfer elemanı olarak kullanabilen *enerji temelleri* son yıllarda yenilikçi bir alternatif olarak düşünülmektedir [63]. Enerji temelleri, kurulum materyallerini çok amaçlı kullandıkları için yalnızca uygun maliyetli değil, aynı zamanda yapısal betonun yüksek ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi nedeniyle daha verimli ısı eşanjörleri olabilirler.

Sığ zemin kaynaklı ısı pompalarının konvansiyonel iklimlendirme sistemlerine göre başlıca avantajları aşağıda verilmektedir [64]:

- Sığ zemin kaynaklı ısı pompaları mevcut sistemlerle kıyaslandığında, verimli olarak kullanıldıkları süre zarfında daha düşük bakım ve onarım maliyetine sahiptir.
- Bir mevsimin ağırlık gösterdiği iklimlerde, sığ zemin kaynaklı ısı pompaları, hava kaynaklı ısı pompaları veya diğer klima sistemlerinden çok daha etkili bir şekilde çalışabilir. Sığ zemin kaynaklı ısı pompaları, diğer elektrikli ısıtma sistemlerinden dikkat çekici bir şekilde de daha verimlidir. Isıtma amacıyla konvansiyonel sistemlerde kullanılması gereken yakıt maliyetine kıyasla zemin ortamının mevcut ısı içeriğinden faydalanabildiği için işletme giderleri bakımından daha az pahalıdır.
- Günlük sıcaklık dalgalanması gösteren iklimlerde, sığ zemin kaynaklı ısı pompaları yüksek verimlilik sunar. Bununla birlikte günlük sıcaklık dalgalanmalarının yüksek olduğu iklimlerde, sığ zemin serpantin sistemleri, (işletimsel) verim katsayısına yarar sağlayabilen ısı depolama özelliğini de sağlayabilmektedir.
- Doğal gazın olmadığı veya doğal gaz ve elektrik enerjisinin ortak kullanımının yüksek olduğu alanlarda, sığ zemin kaynaklı ısı pompaları daha ekonomik olabilmektedir. Isıtma verimliliği (COP) 0,8-0,9 arasında olan geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında, ısıtma verimlilik katsayısı sığ zemin ısı sistemlerinde 3-4,5 arasında olabilmektedir.
- Yüksek doğal gaz (veya fueloil) maliyetleri, geleneksel gaz (veya fueloil) ısıtma sistemi yerine sığ zemin kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesine neden olur. Benzer şekilde elektrik maliyetlerinin yüksek olması, hava-kaynaklı ısı pompası yerine toprak kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesine imkan verebilmektedir.

- Sondaj maliyetlerinin düşük olduğu sahalarda, sıg zemin içerisinde düşey ısı değiştiricili sistemlerin kullanımı özellikle tercih edilebilir.

Bütün ısı pompaları için geçerli en önemli avantajlar, düşük işletim maliyetleri ve CO₂ emisyonları olarak vurgulanabilir. Bu faydalara ek olarak, sıg zemin kaynaklı ısı pompalarının yaşam alanlarında ve diğer binalarda verimli bir şekilde kullanılabileceğini gösteren çok sayıda avantaj aşağıda sıralanmaktadır [65]:

- Isı eşanjörleri zemin içerisinde gömülü olduğundan görüntü kirliliği yaratmamakta ve arsa kullanım alanını azaltmamaktadır. Aksine, rüzgar türbinleri ve güneş panelleri gibi diğer çevre dostu enerji kaynaklarının yer üstünde yer alan ekipmanları büyük yer kaplamakta ve görsel kirliliğe yol açmaktadır.
- Sıg zemin kaynaklı ısı pompaları tarafından iklimlendirilen bina ve tesisler, geleneksel aktif soğutma sistemlerinde olduğu gibi tavana monte edilen büyük soğutma ünitelerine gereksinim duymaz. Bu durum mekanik tesisat ve inşaat maliyetlerinde tasarruf sağlar.
- Sıg zemin kaynaklı ısı pompaları kullanan iklimlendirme sistemlerinde yangın riski oldukça azdır, fosil yakıt kullanımı olmadığından tesisat dairesinde havalandırma gereksinimi kazanlı sistemlere nazaran daha düşüktür.
- Sıg zemin kaynaklı ısı pompaları, ses yalıtımı yapılmış kapalı oda ve bölmelere yerleştirildiğinde oldukça düşük ses üretmektedir.

2.5.3. Sıg Zemin Kaynaklı Isı Pompası Çeşitleri

Sahaya ve binaya özgü sıg zemin kaynaklı ısı sistemlerinin seçiminde bir takım faktörler göz önüne alınmalıdır. Bu faktörler şöyle sıralanabilir [65]:

- Yeraltı jeolojisi ve hidrojeolojik parametreler
- Yüzey alanı ve kullanımı
- Madenler gibi potansiyel ısı kaynaklarının varlığı
- Binaların iklimlendirme talepleri ve binanın termal özellikleri (ısı yalıtımı, cephe malzemesi, çatı kaplaması vb.)

Tasarım aşamasında, zemin ısı pompası sistemini, maksimum performans minimum maliyet ilkesi doğrultusunda boyutlandırabilmek için doğru çalışma parametrelerine ulaşmak gereklidir. Sıg zemin ısı sistemleri temel olarak açık ve kapalı döngü sistemler olmak üzere iki ana başlık altında ele alınabilir.

2.5.3.1. Açık Döngü Sistemleri

Açık döngü sistemleri ısı kaynağı olarak göl, nehir gibi yüzey sularını veya akiferleri kullanırlar. Bu sistemlerin açık döngü olarak adlandırılmalarının sebebi, ısı değiştirici sıvı olarak doğrudan kaynaktaki akışkanı kullanmalarıdır. Açık döngü sistemleri, iklimlendirme yapılacak binaya kaynaktan aldığı suyu pompalayarak çalışmaktadır bu nedenle sistem, binanın ihtiyacını karşılamak için yeterli miktarda akışkanın kaynaktan çekilebilmesine ihtiyaç duyar. Sistemde en az iki adet kuyu bulunmakta olup bir kuyudan binaya çekilen su, ısı pompasına girerek enerji transferi yapıldıktan sonra farklı bir kuyudan tekrar çekilen kaynağına geri bırakılır. Bu tip sistemler doğrudan kaynaktaki akışkanı kullandığından kirletici maddelere maruz kalabilmekte bu nedenle filtrasyon ekipmanları veya ikincil ısı değiştiricileri kullanılmaktadır [65].

Açık döngü sistemleri, sığ zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinin en eski ve yaygın olarak uygulanmış tipidir. Elde edilen tecrübeler doğrultusunda, bu sistemlerin tasarım ve uygulaması görünüşte basit olmasına rağmen, verimli ve güvenilir bir sistemin ortaya çıkması için yeraltı suyu akışının etkisi ve ısı eşanjörü seçimi gibi önemli noktaların dikkatle düşünülmesi gerekmektedir. Yeraltı suyu esaslı açık döngü sistemlerinin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir [1]:

Bu tür sistemler,

- Sahanın jeolojik yapısına bağlıdır. Sistemin kurulu sahanın, akifer üzerinde yer alması bununla birlikte yeterli düzeyde verim sağlayabilecek bir kaynak bulunması gerekir,
- Hidrojeoloji konusunda uzman mühendislerin tasarıma iştirak etmesini gerektirir,
- Sistemde bulunan pompa tesisatları, izleme ve kontrol mekanizmalarının test kuyuları üzerinde çalıştırılarak denenmesi gerekir,
- Yeraltı suyunun kimyasal yönden ve bulanıklık açısından izlenmesi gerekir. Isı pompası, ısı eşanjörleri veya çekim kuyularının tıkanmasını önlemek için bakım ihtiyacı olacaktır.

Bu dezavantajların yanında açık döngü yeraltı suyu bazlı ısıtma ve soğutma sistemleri, oldukça önemli avantajlara sahiptir [1]:

- Sabit bir sıcaklıkta olan ve büyük bir özgül ısı kapasitesine ($4180 \text{ J L}^{-1} \text{ K}^{-1}$) sahip olan sığ zemin ve yeraltı suyu ortamını kullanabilirler.
- Yeraltı suyu iletimi yerine zemin suyunun zorlanmış konveksiyonla ısını çıkarabilirler. Kapalı döngü sistemlerine göre daha yüksek verimlilikle ısı çıkarma kabiliyeti barındırırlar.

- Isı pompası sisteminden geçen kaliteli atık suyun akifere gönderilmesi yerine binada kullanılmaması için hiçbir neden yoktur. Yeraltı suları içme suyu yönünden daha düşük kalitede olsa bile, yine de 'gri' su (yıkama/temizlik amaçlı) olarak kullanılabilir.
- Açık döngü sistemleri, tuzlu yeraltı sularına, örneğin kıyı bölgelerinde yer alan akiferler içerisine de kurulabilir.

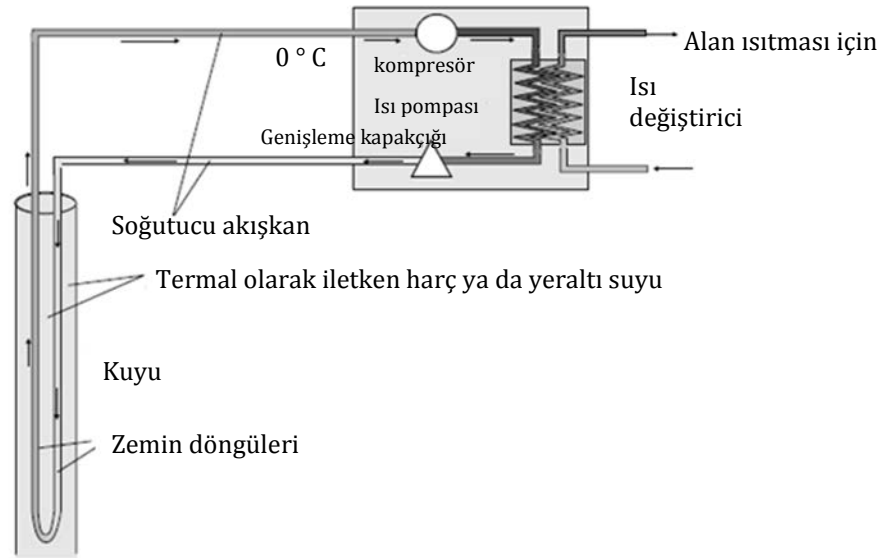
2.5.3.2. Kapalı Döngü Sistemleri

Kapalı döngü sistemlerde sıg zemin ortamı ile ısı alışverişi kapalı sistem içerisinde zemin ya da yeraltı suyundan bağımsız olarak devir daim yaptırılan ısı transfer sıvıları kullanarak gerçekleştirmektedir. İlk uygulanan sıg zemin ısı sistemlerinde ısı transfer boruları içerisinde çevrim yapan su veya su-antifriz karışımları doğrudan yapı içerisinde yer alan iklimlendirme tesisatına pompalanarak pasif ısıtma/soğutma sağlanmaktaydı. Ancak son yıllarda ısı pompası sistemlerinin gelişmesi ile birlikte kapalı sistemlerde çevrim yapan ısı transfer sıvısının enerji içeriği, ısı pompası içerisinde devir daim yapan ve yüksek sıcaklık farkıyla çalışan ikinci bir transfer sistemine aktarılarak aktif ısıtma/soğutma gerçekleştirilir ki bu şekilde daha verimli bir şekilde iklimlendirme elde etmek mümkündür [66]. Kapalı döngü sistemleri doğrudan ve dolaylı döngü türleri olmak üzere iki tiptir.

Doğrudan döngü sistemlerinde, ısı pompasının yüksek sıcaklık farkı altında çalışan soğutucu sıvısı, kapalı bir bakır tüp halkası ile yeraltında dolaştırılır. Bakır tüp yeraltı yüzeyinde sıg bir hendeğe gömülmüş veya dikey bir sondaj kuyusuna monte edilmiş olabilir. Örnek vermek gerekirse, kışlık kullanımda ısı pompasından çıkan soğumuş akışkan zemin içinde döngüye girer, nispeten sıcak olan toprağın ısınıp ısı pompasının kompresörüne geri döner ve enerji çevrimi yeniden başlar (Şekil 2.10.).

Doğrudan döngü sistemlerinin en büyük avantajı, oldukça düşük bir sıcaklıkta çalışabilmesidir (soğutucu giriş sıcaklığı -15°C'ye kadar düşebilir). Sistem ve ortam zemini arasındaki bu geniş sıcaklık farkı toprağın soğutucuya doğrudan aktarılması, dolayısıyla ısının zeminden çok daha verimli bir şekilde emilebileceği anlamına gelmektedir [67].

Ancak ezilme/yırtılma türü hasara duyarlı ve uygun jeo-kimyasal şartlar altında korozyona uğrayabilecek bakır boruların kullanımı konusunda temkinli davranılması gerekmektedir.



Şekil 2.10. Doğrudan sirkülasyon sağlayan kapalı döngü sisteminin şematik diyagramı [1]

Dolaylı kapalı döngü sistemlerini kullanmak suretiyle, yüksek sıcaklık farkıyla çalışan soğutucu akışkanın doğrudan zemin ortamında çevrime sokulması önlenabilir. Bu tip sistemlerde iki bağımsız transfer sıvısı devresi bulunmaktadır. Zemin içerisinde çevrim yapan birinci devrede akışkan düşük sıcaklık farkı altında çalışmaktadır. Bu devredeki taşıyıcı sıvı, zemin yüzeyi altına dikey olarak açılmış bir sondaj deliğine yerleştirilen borularda ya da zemin yüzeyinin hemen altına yatay olarak yerleştirilmiş sargı şeklindeki borular içerisinde çevrim yapar. İkinci devre ise ısı pompası içerisinde çevrim yapmakta olan ve yüksek sıcaklık farkı altında çalışan bir diğer akışkan ile sağlanmaktadır.

Kışlık kullanımda ısı pompasından çıkan enerjisini kaybetmiş (soğumuş) taşıyıcı sıvı birinci devre üzerinden yeraltına gönderilir ve zeminden iletim yoluyla ısı emilir. Enerji içeriği yükselen akışkan ısı pompasına geri gönderilir. İkinci devredeki yüksek sıcaklık farkı altında çalışan sistem ile enerji transferine girdikten sonra döngü tekrar eder.

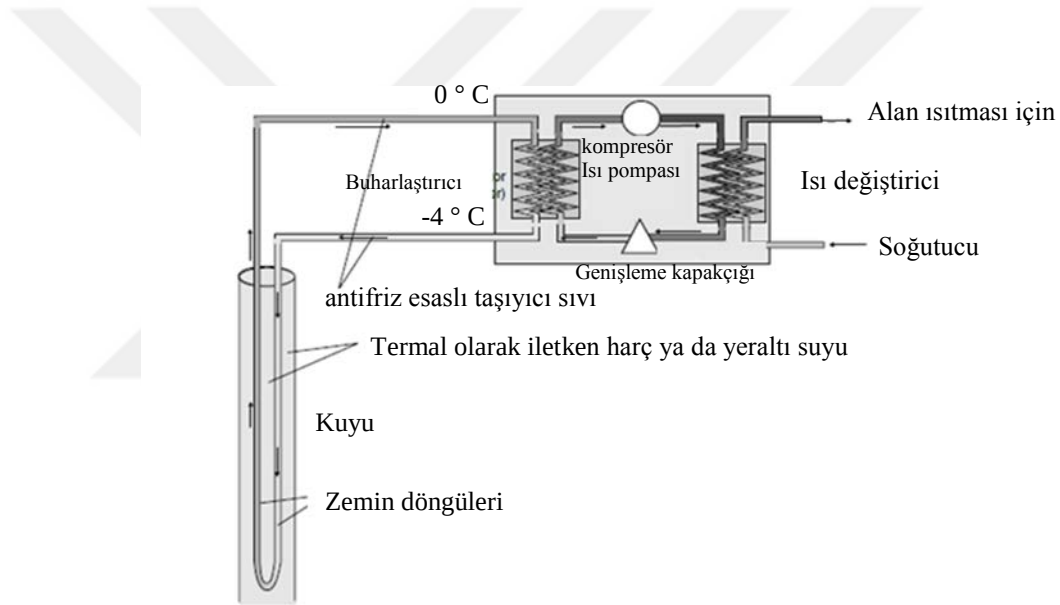
Yazlık kullanımda ise tam tersi geçerlidir. Isı pompasından çıkan birinci devredeki ısınmış taşıyıcı yer altına pompalanarak ısı yükünün bir kısmını nispeten soğuk durumdaki zemine iletir. Bu şekilde ısı pompasına veya binanın soğutma ağına tekrar gönderilmek için soğutulur. Dolayısıyla kapalı devre sistemler, bir yeraltı ısı eşanjörü olarak işlev görür (Şekil 2.11) [1].

İlk uygulanan kapalı döngü sistemlerinde bakır boru kullanmış, ancak borunun ısıl direncinin, sistem performansı için önemli mertebede etkisi olmadığı sonucuna varmıştır. Bu nedenle günümüzde, bakırdan daha düşük termal iletkenliğe sahip olan ancak oldukça daha

ucuz olan korozyona dayanıklı polietilen (PE) borular kapalı devre sistemlerde tercih edilmektedir.

Kapalı sistemlerde taşıyıcı akışkan genellikle su olmakla birlikte, gerektiğinde akışkanın 0°C 'nin altındaki sıcaklıklara soğutulmasına izin veren tipik bir antifriz çözeltisinden oluşabilmektedir. Antifriz maddesi olarak etilen glikol, etanol veya tuz çözeltisi tercih edilebilir. Sıvı akış hızı ve boru çapı, kapalı döngü sisteminde türbülanslı akış koşullarına ulaşılması (Düzensiz akımlar sıvının ısı transferini kolaylaştırır) ve akışkanın gereken ısı miktarını iletebileceği şekilde seçilir.

Döngü çalışma sıcaklığı ve ısı pompası verimliliği arasında bir ilişki olduğu unutulmamalıdır. Kışlık kullanımda, düşük döngü sıcaklıkları zemindeki ısı transferini artırır ancak bu durum ısı pompası için verimlilik katsayısını (COP) azaltabilmektedir.

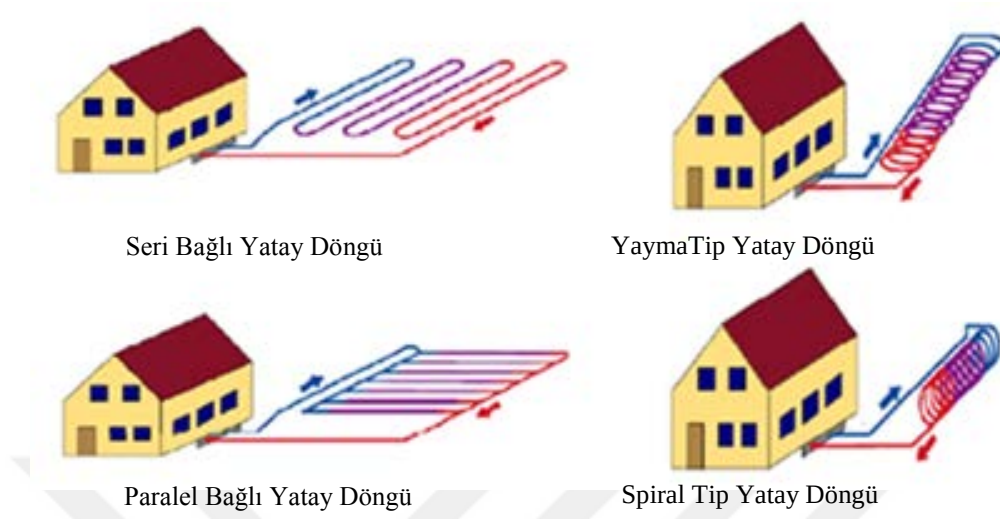


Şekil 2.11. Dolaylı sirkülasyon sağlayan kapalı çevrim sisteminin şematik diyagramı [1]

Dolaylı kapalı döngü sistemleri yatay ve dikey kapalı döngüler olarak iki gruba ayrılmaktadır [65]. Dolaylı kapalı döngü sisteminin en kolay biçimlerinden biri, sığ zeminde açılan hendeklere yerleştirilen yatay kapalı döngü borularından ibarettir (Şekil 2.12.). Böyle bir hendekte en uygun derinlik yaklaşık 1,2-2,0 m olarak kabul edilir (ancak bazı araştırmacılar 1 m kadar sığ bir derinliğin yeterli olabileceğini öne sürmektedir). Genel itibarıyla yatay kapalı döngü sistemlerde uygun derinlik:

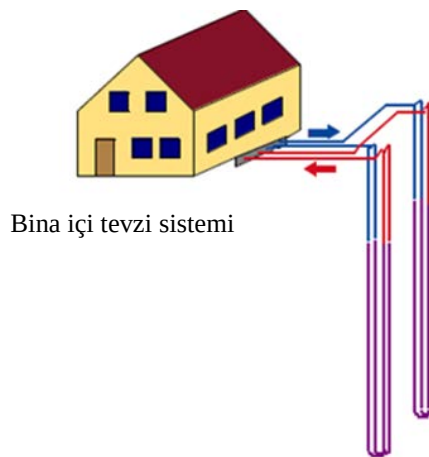
- konvansiyonel kazıcı ile açılacak boyut ve derinlikte olmalıdır;
- kış boyunca ısı transferi sağlayacak düzeyde makul bir toprak nemi içeriği olmalı, döngüyü don olayından izole etmek için yeterli bir termal yalıtım sağlayacak kadar

derin olmalı; güneş ve atmosferik ısıнын nüfuz etmesini sağlayacak kadar da sığ olmalıdır.



Şekil 2.12. Kapalı döngü yatay sistemlerin uygulama şekilleri [65]

Uygulama yapılacak yerde büyük miktarda kullanılabilir alan varsa, yatay açılı teçhizatlar belki de en kolay uygulama yöntemidir. Bununla birlikte pek çok yerde, arsa alanı kısıtlıdır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi, sığ zemin kaynaklı bir sistemin kurulması için alandan tasarruf sağlayabilen sistemlerde, düşey olarak açılmış sondaj kuyuları içerisine kapalı sistemin birinci devre döngü boruları yerleştirilmektedir. Dikey kapalı döngü sistemlerinin özel bir uygulaması da enerji kazıklarıdır.

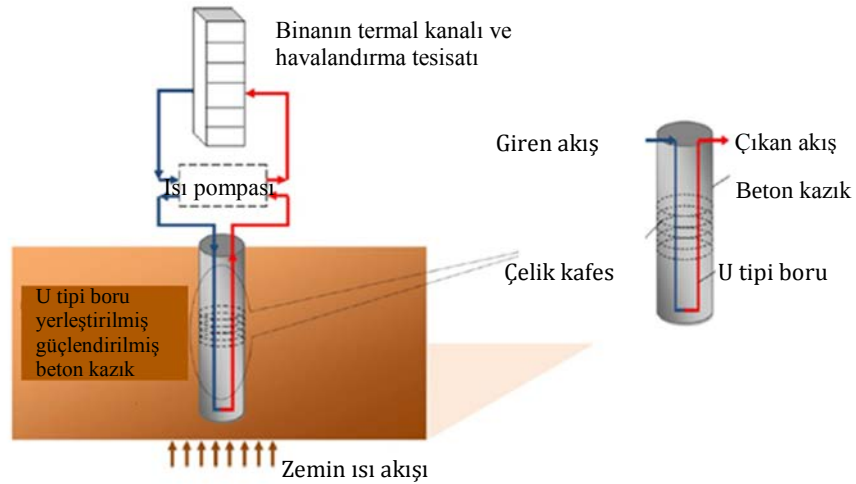


Şekil 2.13. Boru tipi kapalı döngü sistemi (çift U borulu tip) [65]

2.6. Enerji Kazıkları

Zemin kaynaklı ve hava kaynaklı ısı pompası sistemleri karşılaştırıldığında, zeminin sıcaklığının hava sıcaklığına nazaran yıl boyunca daha istikrarlı olması nedeniyle zemin ısı pompası sistemlerinin daha verimli olacağı belirtilmektedir. Literatürde yer alan bilgilere göre zemin kaynaklı ve yeraltı suyunu doğrudan kullanan ısı pompası kullanımı, hava kaynaklı ısı pompası sistemleri ve diğer konveksiyonel ısı sistemleri ile karşılaştırıldığında %18-%56 arasında değişen oranlarda bir maliyet tasarrufu ve karbon dioksit salınımlarında %45-%80 mertebesinde bir azalma sağlayabilmektedir. Zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinde ısı eşanjörü olarak enerji kazıklarının kullanılması, sistem kurulumu için gereken başlangıç maliyetini önemli düzeyde düşüreceği belirtilmektedir [68].

Enerji kazıkları, ısı eşanjörü borularının fore kazıklara ilave edilmesiyle oluşan sistemlerdir (Şekil 2.14). Enerji kazıkları, sıkı zemin ortamının efektif bir enerji depolama sistemi olduğu düşünüldüğünde konut ve tesis projeleri için önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir. Enerji kazıklı iklimlendirme sistemleri yapı-zemin arası ısı transferi, zemin ortamındaki termal enerjiyi fore kazıklara yerleştirilen ısı transfer boruları içerisinde devir daim yapan akışkan vasıtasıyla üst yapıya nakletmek suretiyle gerçekleşir. Isı eşanjörü boruları, binalar için kışın ısınma ihtiyacını karşılamak için gerekli olan termal enerjiyi üretmek ve yazın hava şartlarından kaynaklanan aşırı ısıyı dışarı atmak için bir ısı pompasına bağlanır [69].



Şekil 2.14. Enerji kazığı bileşenleri [70]

Bu teknoloji, sıkı jeotermal enerjinin kazanımı için kazık temellerin yapısal rolünü zemin-yapı arası enerji aktarımı özelliği ile birleştirmektedir. Sıkı jeotermal enerjinin

kullanılması, temel ve çevre zemine uygulanan ilave bir termal yük oluşturmaktadır. Enerji kazığı sistemlerinin birinci rolü üst yapının stabilitesinin sağlanması olup, bu gereksinimi ek termal yük varlığında bile karşılamalıdır. Enerji kazıkları, yapısal beton içine yerleştirilmiş ısı eşanjör boruları ile donatılmıştır. Isı eşanjörü akışkanının ulaşabileceği en yüksek sıcaklıklar -5°C ile 50°C aralığındadır [63]. Yaygın olarak yapılan uygulamalarda ise çalışma sıcaklık aralığı 3°C ile 35°C arasında gerçekleşmektedir [62].

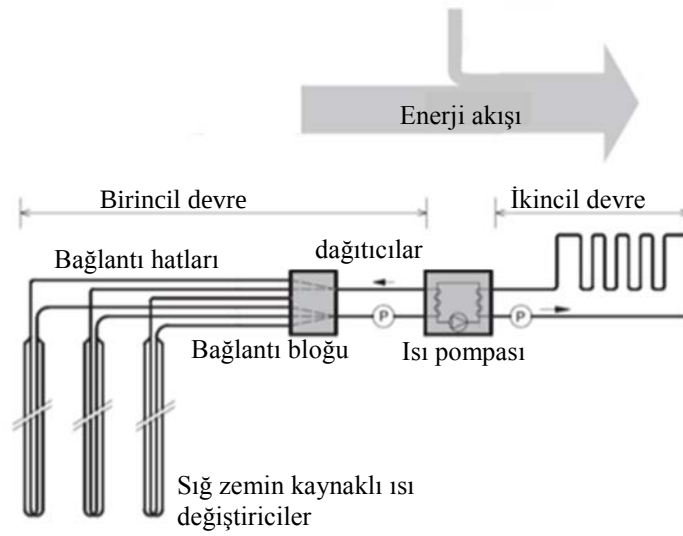
Hava kaynaklı iklimlendirme sistemleri vb. geleneksel ısı sistemleri, soğutucu akışkan ve atmosfer arasında ısıyı değiştirmek için konvektif hava akımı kullanırken, enerji kazıkları gibi zemin kaynaklı sistemlerde, sistem ve zemin arasındaki ısı akışının yanında ısı değiştirici sıvıda konvektif ısı akışı meydana gelir. Bu yöntem özellikle sığ zemin ısı sistemlerinin verimliliğine katkıda bulunmaktadır, zira birkaç metreden daha derin zemin ortamında sıcaklık, yıl boyunca büyük oranda sabit kalır; kışın dış hava sıcaklığından daha yüksek, yaz aylarında ise daha düşük sıcaklıkta olur. Enerji kazığı içerisinde yer alan ısı eşanjörüne bağlanan ısı pompaları kış mevsimi boyunca sığ zemin ortamından üst yapıya ısı aktarırken, yaz aylarında ise üst yapıda oluşan fazla ısıyı zemin ortamına enjekte ederler.

Enerji kazıkları, üst yapı için taşıyıcı bir temel elemanı vazifesi görürken aynı zamanda ısı eşanjörü olarak işlev görmektedir. Bu sistemin en büyük avantajı, ısı eşanjörleri olarak işlev gören temel unsurların yapısal gerekçelerle inşa edilecek olduğundan sığ zemin ısı sistemi için ayrıca sondaj ve betonlama gereksinimini ortadan kaldırmasıdır. Ayrıca, enerji kazıklarının bünyesinde yer alacak olan ısı transfer boruları zemin yerine termal iletkenliği oldukça yüksek olan beton ile doğrudan temas halinde olacağından zemin içine doğrudan yerleştirilen eşanjör sistemlerine göre daha verimli olabilmektedir [65].

Kuzey Avrupa'da, binaların ısıtılması ve havalandırılması için yapısal temel kazıklarının kullanılması fikri ilk kez 80'li yılların ortalarında Avusturya'da ve daha sonra İsviçre ile Almanya'da uygulanmaya başlandı. Doğal avantajların bir sonucu olarak, enerji kazıkları artık Avrupa'daki birçok ülkede olduğu gibi Kanada, Japonya ve Çin'de de kullanılmaktadır. Son yıllarda artan sayıda kurulum için, Alman Mühendisler Odası (VDI), enerji kazıkları hakkında bir teknik kılavuz yayınlamıştır [66].

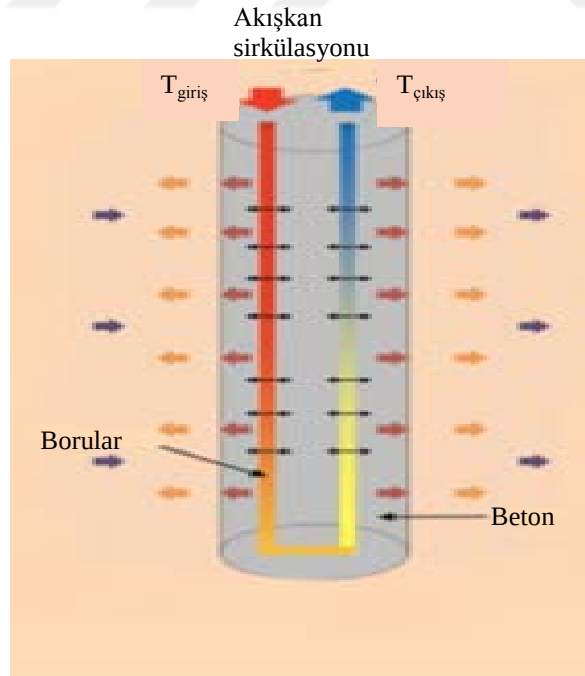
2.6.1. Enerji Kazıklarında Birinci Devre Isı Transfer Mekanizması

Isı transfer sisteminin birinci devresi, çevre zemin ile ısı alışverişi mekanizmasından oluşur (Şekil 2.15). Enerji kazıkları, bu devrede ısı eşanjörü olarak çalışırlar. Kazıklar borular ve yapısal betondan oluşur. Bilindiği üzere beton iyi bir ısı iletkenliğine ve termal depolama kapasitesine sahiptir. Isı değişimi için, ısı taşıyıcı akışkan enerji kazıklarında devir daim yapan kapalı döngü sisteminde dolaşır [39].



Şekil 2.15. Enerji kazıklarından oluşan jeotermal sistem şeması [63]

İçinde ısı taşıyıcı akışkan dolaşan enerji kazığı ile çevresindeki zemin arasındaki sıcaklık farkı, ısı transferine imkan vermektedir. Enerji kazık sisteminde yer alan ısı transfer mekanizmaları Şekil 2.16 'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Enerji kazıklarında ısı transfer mekanizması [68]

Bu ısı transfer mekanizmaları:

1. Beton / harç veya çelikte iletken ısı akışı
2. Zeminde iletken ısı akışı
3. Sıvı ile boru arasında konvektörel ısı akışı
4. Zeminde konvektif ısı akışı (yeraltı suyu akışı mevcutsa)

Sistemde üretilebilecek kullanılabilir ısı miktarı Eşitlik 2.6' da belirtilmiştir [68]:

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = m C_{\text{fluid}} (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (2.6)$$

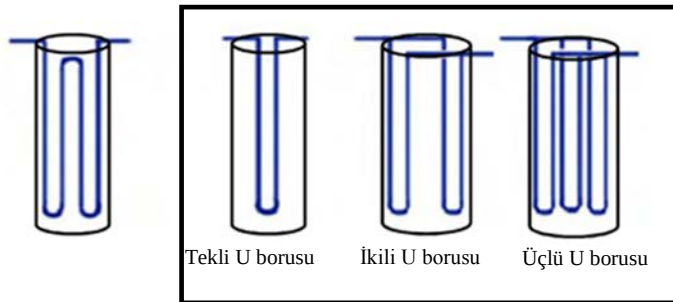
formülü ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte kullanılan parametreler aşağıda açıklanmıştır:

- m : akışkanın kütle yoğunluğu (kg)
 C_{fluid} : Akışkan sıvının ısı kapasitesi (J / kg.K)
 Q : elde edilen toplam ısı enerjisi (J)
 T_{in} : giriş sıcaklığı (K)
 T_{out} : çıkış sıcaklığı (K)

Enerji kazıklarının içine yerleştirilen eşanjör boruları yaygın olarak yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) imal edilmektedir. Eşanjör boru çapı 20 mm-25 mm arasında değişir [63]. Borularda kullanılan ısı transfer sıvısı su ve etanol karışımıdır, ancak ekonomik olması nedeniyle tuzlu su çözeltileri de kullanılabilmektedir. Enerji kazıkları içine boruların optimum yerleşimi için birçok farklı konfigürasyon literatürde önerilmektedir (Şekil 2.17). En yaygın döngü yapılandırmaları:

W tipi akışkan borular

U tipi akışkan borular



Şekil 2.17. Enerji kazıkları için farklı tiplerdeki eşanjör yerleşleri

Enerji kazıklarında eşanjör borular yoluyla dolaşan akışkanın sıcaklıkları için sınır değerler vardır. Yaz modu sistemi için, ısı zemine pompalanırken, akışkan sıcaklığı +40°C'nin altında tutulurken [71] kış modu sisteminde, ısı sığ zeminden çıkarıldığında sıcaklık 0°C'nin

altına düşmemelidir [63]. Bununla birlikte Loveridge, bu sıcaklık sınırların konservatif bir yaklaşım olduğunu ve eşanjördeki akışkan sıcaklığının negatif olduğu her durumda kazığı çevreleyen zeminde de negatif sıcaklıkların oluşmayacağını belirtmiştir [72].

2.6.2. Enerji Kazıklarında İkinci Devre Isı Transfer Mekanizması

Zemin kaynaklı ısı pompası ve enerji kazık sistemlerinde ikinci devre, binanın içine kurulan ısıtma ve soğutma dağıtım sistemidir. Birincil ve ikincil devre arasındaki sıcaklık farkı en yüksek olduğunda ikincil devre için en yüksek verimlilik değerleri elde edilir. Bu şekilde, zemin enerji sistemleri, binanın içindeki düşük sıcaklıklı dağıtım sistemleri ile kullanıldığında en yüksek verimliliğe ulaşmaktadır [72].

2.7. Enerji Kazık Grupları (Enerji Temelleri)

Geçen yüzyılda, pek çok yapının ve alt yapının desteklenmesindeki yaygın uygulamalarından dolayı kazık temellerin analizi ve yapısal tasarımına yönelik önemli miktarda araştırma yapılmıştır. Klasik olarak, kazıklı temeller, yeterli taşıma kapasitesine sahip olmayan zeminlerde üst yapı yükünü daha sağlam zemin tabakalarına aktarabilmek için uygulanmıştır. Son yıllarda kazıklı temeller, sığ zemin ısı sistemleri ile birleştirilerek yenilenebilir enerji üretmek amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Enerji kazıkları incelenirken, geleneksel olarak hesaplanmış üst yapı mekanik yükleri ile bağlantılı olarak termal yüklerin de hesaplanması ve termal etkilerin bu tür temellerin mekanik davranışına etkileri araştırılmalıdır.

Loria ve diğ. [73] , bitişik kazıkların bireysel etkilerini grup davranışına dahil ederek, termal yüklere maruz kalan kazık grupların eşdeğer yer değiştirme davranışlarını tahmin etmek üzere bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem hem mekanik hem de termal yüklere maruz kalan kazık gruplarının yer değiştirme davranışını tahmin etmek için önceki yöntemlerle birlikte kullanılmıştır. Gruptaki kazıkların sayısı, gruptaki kazıklar arasındaki mesafe, kazıkların gruptaki narinlik oranı, çevreleyen zeminin Poisson oranı ve zemin tabakasının göreceli derinliğinin grup kazıklara etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, tüm kazıkların aynı sıcaklık değişimine maruz bırakıldığı kazık grubunda, maksimum düşey deplasman merkezdeki kazıkta gerçekleşirken, minimum yer değiştirme köşe kazıklarında meydana gelmektedir ve yan kazıkların düşey yer değiştirmesi ortalama düzeyde olmaktadır.

Laloui ve diğ. [74], dört adet enerji kazığından oluşan grupta yerinde deneyler gerçekleştirmiş ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Deney kazıklarının yüzeyden itibaren ilk dört metresi için ısı yalıtımı yapılarak, kazık grubunda termal yükün, yayılımı ile ilgili gözlem yapılmıştır. Dört kazığa yapılan eşzamanlı ısıtma deneyi ve tek kazığa yapılan termal testler

sırasındaki kazık termo-mekanik tepkileri karşılaştırıldığında önemli bir grup etkisi olduğu kanıtlanmıştır.

Laloui ve diğ. [75], bir diğer çalışmalarında enerji kazıklarının termo-mekanik davranışlarını araştırmak üzere sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapmışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, yüksek sıcaklık değişimi altında, grup kazıkların birlikte ve eşit bir şekilde ısıtıldığında, termal etkiyle oluşan basınç gerilmelerinin ortalama 4 MPa 'a ulaşırken sadece bir veya üç adet kazık ısıtıldığında, termal etkiyle oluşan basınç gerilmelerinin belirginleşerek 7 MPa'a ulaştığı gözlenmiştir.

Laloui ve diğ. [76], enerji kazık gruplarını inceledikleri bir diğer çalışmada, elde ettikleri deneysel ve nümerik sonuçları karşılaştırılmalı olarak tartışmıştır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgilere göre, enerji kazıklarında ısıtma-soğutma döngüleri nedeniyle oluşan mekanik etkilerin, enerji kazık gruplarının analizi ve tasarımı için önemli olduğu düşünülmektedir.

2.8. Enerji Kazıklarının Geleneksel İklimlendirme Sistemlerine Göre Avantajları

Zemin kaynaklı ısı pompası sistemleri hem yenilenebilir olması hem de yüksek verimlilik sergilemesi nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinin özel bir türü olan enerji kazıkları şehir merkezinde yer alan yapılar için özellikle cazip hale gelmiştir; çünkü büyük yapıların çoğu kazık temellere zaten ihtiyaç duymaktadır, bu nedenle iklimlendirme amacıyla en düşük mekansal gereksinimleri sunmakta ve en düşük toplam maliyeti sağlamaktadır [47].

Enerji kazıkları uzun vadede ekonomik açıdan faydalıdır. Genelde benzer veya daha yüksek başlangıç yatırım maliyetlerine ihtiyaç duymalarına rağmen, geleneksel iklimlendirme sistemlerine kıyasla daha düşük işletme maliyetleri sahip olmakla birlikte çok uzun kullanım ömrü sunabilmektedir. Yeraltı suyu kirliliğine sebep olmamakta ve ısı eşanjörleri yer altında bulunduğundan arsa kullanım alanını kısıtlamamakta ve görüntü kirliliğine sebep olmamaktadır.

2.9. Enerji Kazıklarının Uygulamasında Yaşanabilecek Olası Zorluklar

Enerji kazıklarının yapımında ve kullanılması sırasında karşılaşılabilecek bazı potansiyel zorluklar vardır. İlk olarak, bu konuda uygulamaların henüz ülkemizde yaygınlaşmamış olması nedeniyle doğru tecrübeye sahip görevlilerinin bulunması konusunda zorluklar yaşanabilmektedir. Bununla birlikte kalifiye olmayan uygulamacılar tarafından yapılan

sistemlerde enerji kazıklarında yer alan hasar görmüş ya da tıkalı ısı iletim boruları nedeniyle yetersiz çalışan düşük verimli sistemler birçok uygulamada karşılaşılan sorunlardandır [47].

Çevrimsel ısıtma ve soğutmanın kazık performansına etkisi hakkında da önemli kaygılar da bulunmaktadır. Bu sistemin ısı alışverişi, zemin döngüsündeki sıvının dolaşım hızına, sistemin ısıl iletkenliğine ve giriş ve çıkış su sıcaklığına bağlı olacaktır. Giriş ve çıkış su sıcaklıkları soğutucu akışkanın sıcaklığının bir fonksiyonudur.

Enerji kazıklarının ısıl verimliliğini etkileyen en temel faktörler şunlardır:

- Zemin koşulları
- Zemin ısıl özellikleri
- Eşanjör boru konfigürasyonları
- Kazıklı temel geometrisi
- Yeraltı suyu akışı

Bahsedilen faktörler arasında yer alan yeraltı suyu akışı parametreleri enerji kazıklarının ısıl verimliliğini önemli derecede etkileyebilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Enerji Kazıklarının Isıl Verimliliğine Yeraltı Suyu Akışının Etkisi

Sığ zeminde yeraltı suyunun varlığı ve hareketleri, ısı transferi mekanizmasını daha da karmaşık hale getirmektedir. Enerji kazıklarının uygulandığı zeminde yeraltı suyunun mevcudiyeti, kazık-zemin arasındaki ısı iletimini dolayısıyla enerji kazıklarının ısı verimliliğini etkilemektedir.

Mevcut tasarım araçlarının çoğu sadece ısı iletimi prensiplerine dayanmaktadır ve yeraltı su akışının ısı taşımada ne gibi etkileri olduğu analizlerde düşünülmemektedir. Bunun temel nedenleri, konvektif ısı transferinin modellenmesi ve mühendislik uygulamasında gerçek yeraltı suyu koşullarının belirlenmesinde karşılaşılan güçlüklerdir.

Genel olarak, yeraltı suyu sızma koşulları, enerji kazıklarının hem ısıtma hem de soğutma modlarında ısı transfer sıvısının sıcaklığı üzerinde ılımlı bir etkiye sahip olduğundan, enerji kazıklarının termal performansı için yararlıdır. Bir yeraltı suyu sızıntısının zamanla enerji kazığı etrafındaki olası ısı birikimini azaltmada belirgin bir fark yaratması beklenmektedir. Sonuç olarak, ısı transfer modelindeki yeraltı suyunun akışını hesaba katmak gerçekçi bir sonuç elde edebilmek için önem arz etmektedir.

Lee ve diğ. [77], yaptıkları çalışmada, yeraltı suyu akışının hem yönünün hem de oranının tek hatlı, L-tipi ve dikdörtgen şeklindeki enerji kazık sistemleri üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Araştırmalar sonunda dikdörtgen tarzda sistemlerin, yeraltı suyu akışının yönünden belirgin bir şekilde etkilenmediği, tek hat dizilimindeki sistemin ise yeraltı suyunun akış yönünden çoğunlukla etkilendiği belirtilmiştir. Akış oranına duyarlılık (veya akış hızının büyüklüğü) açısından, dikdörtgen tarzda imal edilen enerji kazık gruplarının diğer konfigürasyonlara kıyasla çok daha hassas olduğu belirlenmiştir.

Fang ve diğ. [78], yeraltı suyunun sığ zemin kaynaklı ısı pompası sistemlerinin performansı üzerindeki etkisini tahmin etmek için, gözenekli ortamdaki ısı transferi için bir iletim difüzyon denklemi oluşturmuş ve ısı yayılımı için analitik çözümler elde etmişlerdir. Hesaplamalar, gözenekli ortamdaki su iletiminin, iletken sıcaklık dağılımını önemli derecede değiştirebileceğini, zemin içerisinde daha düşük sıcaklık yükselmelerine yol açtığını ve belirli bir akım hızından itibaren zemin içinde sabit bir sıcaklık profili oluşturduğunu göstermektedir.

Jiang ve diğ. [79], çalışmalarında farklı yeraltı suyu hızlarının etkisini incelemiş ve yeraltı suyunun ısı transferine çeşitli derecelerde etki yaptığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca yeraltı suyu hızının artmasının, hem yaz hem de kış dönemi kullanımında olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve diğ. [80], yaptıkları çalışmada, doğal zemin sıcaklık profili ölçümlerine dayanarak, yeraltı suyu akışının özelliklerinin kapalı döngü sistemlerinin termal performansı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Analiz sonunda yeraltı suyunun varlığı nedeniyle kuyu tipi kapalı döngü sistemlerinin termal performansının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yeraltı suyunun etkisinin zeminin dağılım ve kalınlık yüzdesine büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmadaki kuyu tipi kapalı döngü sistemlerinin zemine ısı enjeksiyonu ve zeminden ısı emilimi, yeraltı suyu akışının olmadığı duruma kıyasla kaba kum ve çakıl tabakasında sırasıyla %9,8 ve %12,9 oranlarında artmıştır.

Çeşitli toprak ve kayaçların termal ve hidrolik özellikleri birçok araştırmacı tarafından bilinmesine rağmen, sığ zemin kaynaklı sistemlerin tam anlamıyla değerlendirilmesi yeraltı suyu akışı hakkında bilgi eksikliği bulunması nedeniyle, mühendislik uygulamalarında mümkün olmamaktadır. Ancak verimli ve sürdürülebilir enerji kazıklı temellerin tasarlanıp uygulanabilmesi için hidrojeolojik koşulların hassaslıkla araştırılması konusunda gayret gösterilmelidir.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Enerji kazıklarıyla ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Yapılan çalışmaların çoğu sayısal modelleme odaklıdır, çünkü enerji kazıklarının deneysel yöntemlerle incelenmesi hem zahmetlidir hem de ekonomik açıdan dezavantajlıdır. Bu çalışmada, tekil ve grup tarzda imal edilen enerji kazıklarının farklı zemin ve yeraltı suyu koşulları için enerji yönünden performans ve verimliliğinin sayısal yöntemle dayalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Analizler GeoStudio paket programı içerisinde yer alan, TEMP/W ve SEEP/W [81-82] olarak bilinen iki farklı sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

TEMP/W, zemin termal problemlerinin analizi için tasarlanmıştır ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımdır. Program hem kararlı durumdaki termal iletkenlik problemlerini hem de geçici durumdaki problemleri analiz edebilir, ayrıca donma- çözülme problemlerini modellemek için de kullanılabilir [81].

SEEP/W ise, yeraltı suyu sızıntısını ve gözenek-su basıncı dağılımı problemlerini sonlu elemanlar yöntemine dayalı şekilde analiz etme olanağı sağlayan bir diğer GeoStudio yazılımıdır. Program, basit doymuş-kararlı durum problemlerinden, karmaşık-doymuş/yarı doymuş ve zamana bağlı problemlere kadar değişen analizleri gerçekleştirmeye olanak sağlar [82].

TEMP/W, yeraltı suyu akımının neden olduğu konvektif ısı transferini hesaba katmak için SEEP/W ile birlikte ortak analiz yapma özelliğine sahiptir. Bu çalışmada da yeraltı suyunun enerji kazıklarının performansına ve zemin sıcaklık profiline etkisini araştırmak için TEMP/W

ve SEEP/W programları birlikte kullanılarak analizler yapılmıştır. TEMP/W model yapısında ısı iletimi nedeniyle meydana gelen ısı akışı:

$$F = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilebilmektedir. Bu denklemde F ısı akısı, λ ısı iletkenliği, T sıcaklığı ve x mesafesi, iletimden kaynaklanan ısı akışının doğrudan bir maddenin ısı iletkenliğine ve sıcaklık gradyanına bağlı olduğunu göstermektedir. Denklemdaki negatif işaret, bir materyal üzerinde pozitif bir ısı akışı uygulandığında, sıcaklık değerinin artan x yönünde azaldığını göstermektedir. TEMP/W formülasyonunda kullanılan kontrol diferansiyel denklemi ise;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = h \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu denklemde, λ_x , maddenin x yönündeki termal iletkenlik değerini, λ_y , maddenin y yönündeki termal iletkenlik değerini, Q, ısı akısı ve h, zemin-su -buz karışımının ısı depolama kapasitesini ifade eder. Bu denklem, bir madde hacmine zaman içinde giren ve çıkan ısı akışının arasındaki farkın, depolanan ısı enerjisindeki değişime eşit olduğunu göstermektedir.

Isı depolama kapasitesi iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, maddenin hacimsel ısı kapasitesini kapsamaktadır (donmuş veya donmamış durum). İkinci kısım ise faz değişimiyle ilişkili olan faz değiştirme ısıdır. Eşitlik (4.3), bir maddenin ısıyı depolamadaki kapasitesini, c, maddenin hacimsel ısı kapasitesini, L faz değiştirme ısısını ve Q_u , toplam donmamış hacimsel su içeriğini ifade etmektedir.

$$h = c + L \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \quad (3.3)$$

Konvektif ısı transferinin etkilerini analizlerde görmek için TEMP/W programı, analizin her adımında modeldeki her Gauss düğüm noktasına su ve hava içeriği ile su ve hava hızını ilave etmelidir. Bu bilgi ile ısı akışı için kısmi diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde değiştirilebilir:

$$\left(\rho_s c_{ps} + L \theta_w \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[K_t \frac{\partial T}{\partial y} \right] + c_{pa} \frac{\partial (\dot{m}_a T)}{\partial y} + \theta_w \rho_w c_{pw} \frac{\partial (q_w T)}{\partial y} + Q \quad (3.4)$$

Burada, $\rho_s c_{ps}$, toprağın hacimsel ısı kapasitesidir, $c_{pa/w}$, hava ya da suyun kütle spesifik ısısıdır, Θ_w , hacimsel su içeriği, $\dot{m}_a$, havanın kütle akış hızıdır. $\partial \Theta_u = \partial T$ donmamış su içeriği fonksiyonunun eğimi, q_w suyun spesifik deşarjı ve L , suyun faz değiştirme ısısıdır.

K_t tanımı DeVries, Shoop ve Bigl tarafından, toprak-su-buz karışımının ısı iletkenliği olarak tanımlanmış ve denklem halinde açıklanmıştır. Eşitlik 4.5'e göre, K_w , suyun ısı iletkenliğini K_i , buzun ısı iletkenliğini, K_s zeminin ısı iletkenliğini, Θ_u hacimsel buz içeriğini ve Θ_0 ise zemin porozitesini ifade etmektedir.

$$K_t = K_w \Theta_u + K_i \Theta_i + K_s (1 - \Theta_0) \quad (3.5)$$

SEEP/W programı temelinde, Darcy kanununu temel alan zemin içerisindeki su akışını formülize etmiştir. Buna göre, q_w hız, k hidrolik iletkenlik ve i toplam hidrolik eğimi ifade etmekte olup aşağıda gösterilmektedir:

$$q_w = ki \quad (3.6)$$

Darcy kanunları başlangıçta doymuş zemin türleri için türetilmesine rağmen, daha sonraki araştırmalar, yarı doymuş zemin içerisinde su akışına sahip durumlarda da uygulanabileceğini göstermiştir. Tek fark, doymuş olmayan akım koşulları altında hidrolik iletkenliğin sabit bir değere sahip olmamasıdır.

İki boyutlu sızma durumu için genel olarak kullanılan diferansiyel denklem,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T_h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T_h}{\partial y} \right) + Q_w = \frac{\partial \Theta_w}{\partial t} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilmekte olup burada toplam yük T_h , k_x x yönündeki hidrolik iletkenliği, k_y , y yönündeki hidrolik iletkenliği, Θ_w uygulanan suyun sınır akısını ve t zamanı belirtir.

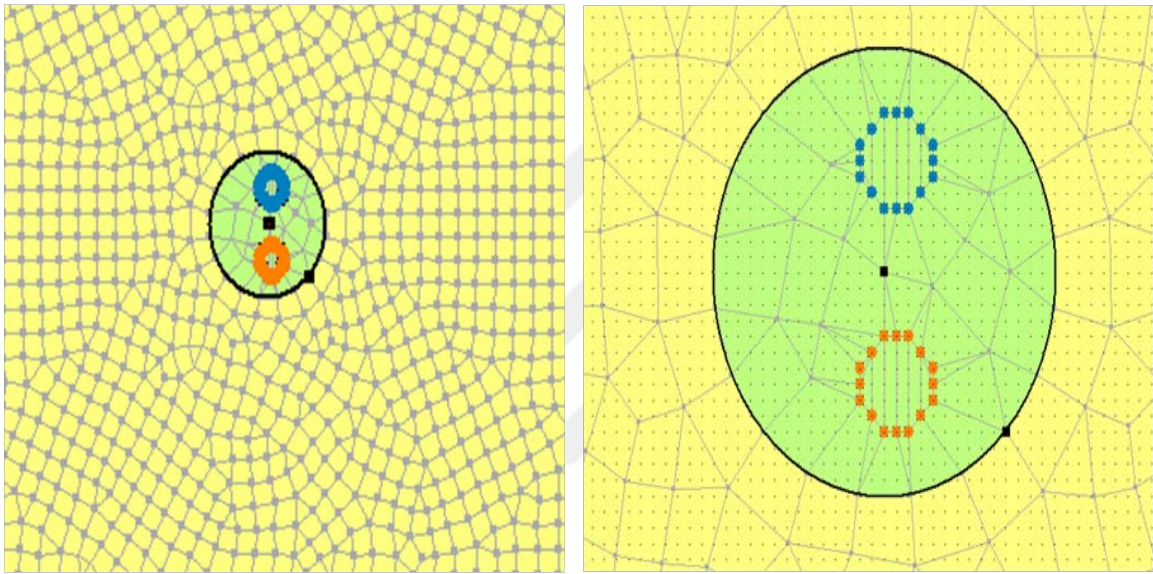
Bu denklemde, belirli bir zaman diliminde bir zemin elemanı hacmine giren ve çıkan su akışı arasındaki farkın, zemin sistemlerinin depolamadaki değişimine eşit olduğuna işaret eder. Daha temel olarak düşünülürse, x ve y yönlerinde akış değişim oranları ve harici uygulanan su akışı toplamı, hacimsel su içeriğinin zamana göre değişim oranına eşittir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

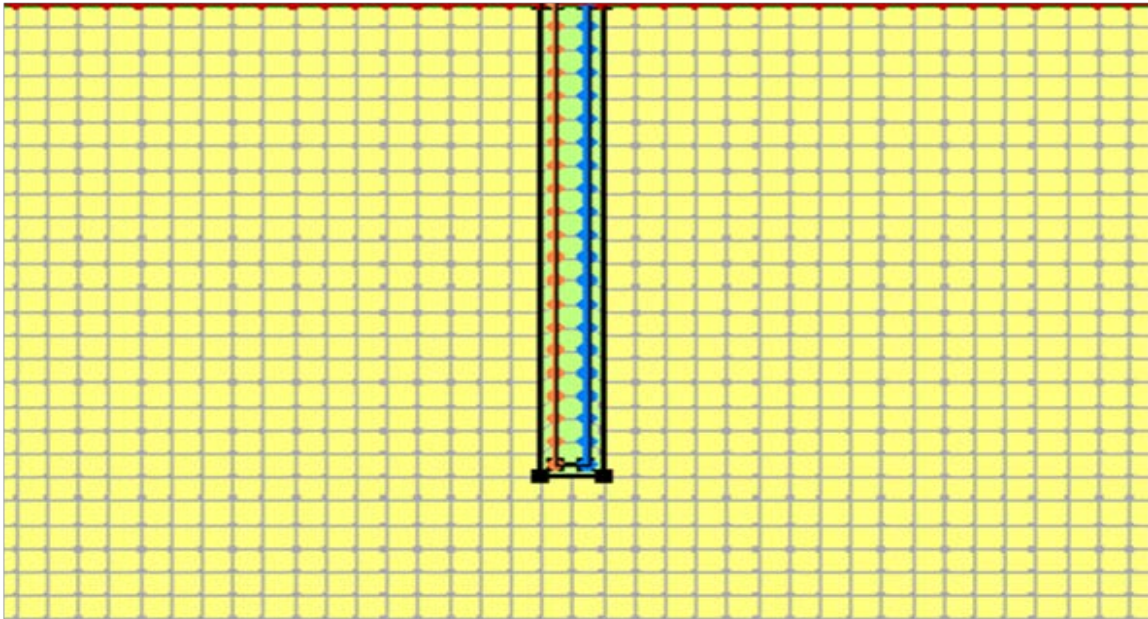
4.1. Tekil Kazık İçin Sonlu Elemanlar Modeli

Tekil kazıkta modelleme çalışmaları, plan analiz (Şekil 4.1) ve kesit analiz (Şekil 4.2) olmak üzere iki farklı model kullanarak kış ve yaz modları için ayrı ayrı olmak üzere, TEMP/W ve SEEP/W programlarının ortak kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizlerde yeraltı suyu akış hızı ve zeminin hidrolik iletkenlik değeri dışında, zemin ve enerji kazığının özellikleri sabit tutulmuştur. Tüm analizlerde kullanılan ortak analiz parametreleri Tablo 4.1 'te belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Plan Analiz Modeli



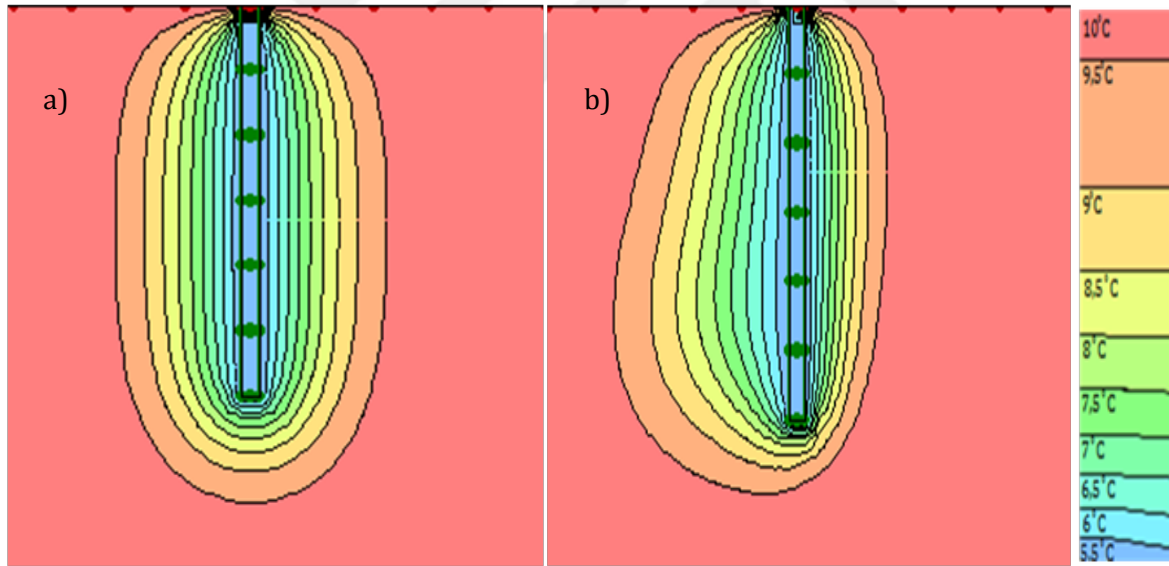
Şekil 4.2. Kesit Analiz Modeli

Tablo 4.1. Analizlerde kullanılan ortak parametreler

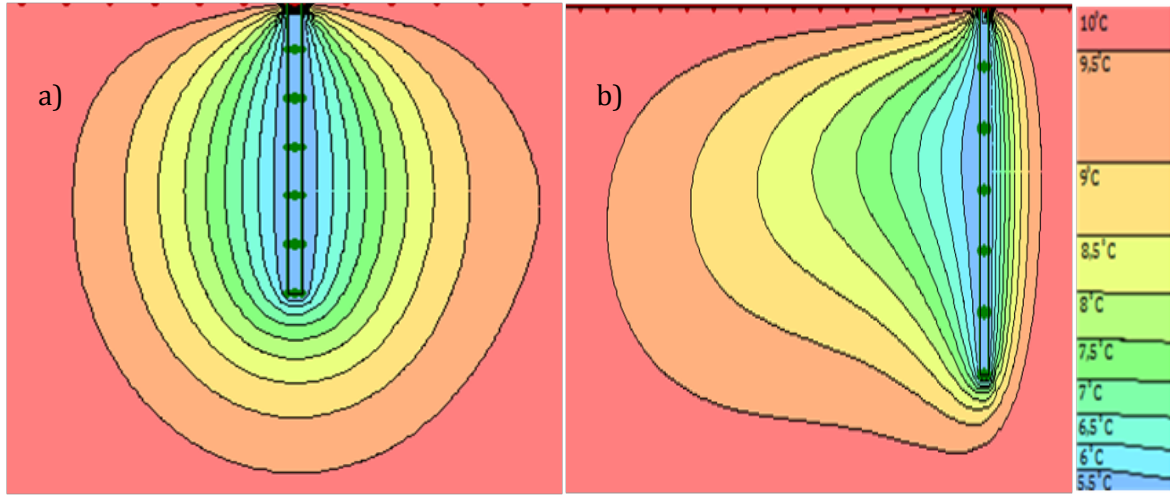
Zemin su muhtevası (%)	0,3
Zemin yüzey sıcaklığı (°C)	10
Zemin hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	2,5
Zemin termal iletkenliği (W/mK)	2,4
Kazık termal iletkenliği (W/mK)	1,47
Kazık hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	1,8
Kazık hidrolik iletkenliği (m/gün)	1.9×10^{-8}
Borularda tanımlanan akışkan sıcaklığı kış modu- yaz modu (°C)	5-15

4.1.1.Kış Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminden Isı Kazanımı) Tekil Enerji Kazığından Zemine Isı Yayılmının Modellenmesi (Kesit Analiz)

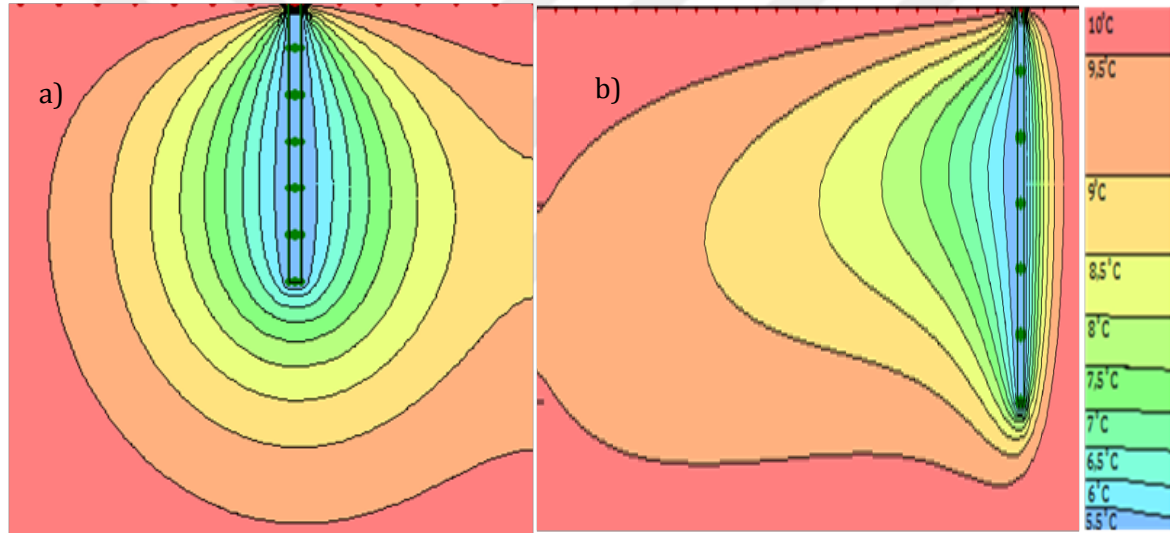
Tekil enerji kazığı analizinde, sonlu elemanlar programı TEMP/W ve SEEP/W kullanılarak, programlarda kullanılan sabit parametrelere ek olarak yeraltı suyu akış hızının 0.16 metre/gün olduğu değer kullanılmıştır. Elde edilen sıcaklık profilleri, zemin hidrolik iletkenlik değerinin 0,864 m/gün olduğu analize ve 30, 180, 360 günlere aittir (Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5) .



Şekil 4.3. a) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)



Şekil 4.4. a) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)



Şekil 4.5. a) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki zemin sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

Analizden alınan görüntülerde sol tarafa doğru tanımlanan yeraltı suyunun akış yönüne göre, yeraltı suyunun bulunmadığı analizde kazığın etrafında simetrik sıcaklık profili oluşurken yeraltı suyunun bulunduğu analizde enerji kazığından zemine yayılan ısının sol tarafa doğru taşındığı görülmektedir.

Enerji kazığının sol kenarından 1 metre, 3 metre ve 5 metre uzaklıkta alınan sıcaklık değerleri Tablo 4.2 'te gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Kış modunda Kazığın etrafındaki belirli noktadaki sıcaklık değerleri

Sıcaklık Değerleri (C)	Yeraltı suyu akışının olmadığı analizdeki sıcaklık değerleri			Yeraltı suyu akışının olduğu analizdeki sıcaklık değerleri		
	1 metre	3 metre	5 metre	1 metre	3 metre	5 metre
Kazığa uzaklık						
30 gün	7,94	9,44	9,85	7,58	8,95	9,48
180 gün	6,33	7,87	8,88	5,93	6,93	7,59
360 gün	6,15	7,53	8,48	5,91	6,87	7,48

Kış modunda tekil enerji kazığının kullanılmasının amacı, zeminle akışkan sıvıyı taşıyan borular arasında ısı transferinin gerçekleşerek, eşanjör borularındaki akışkanın sıcaklığının artırılarak ısı pompasına iletilmesidir. Kazığın belirli noktalardaki sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak, ısı yayılım parametresi (η) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

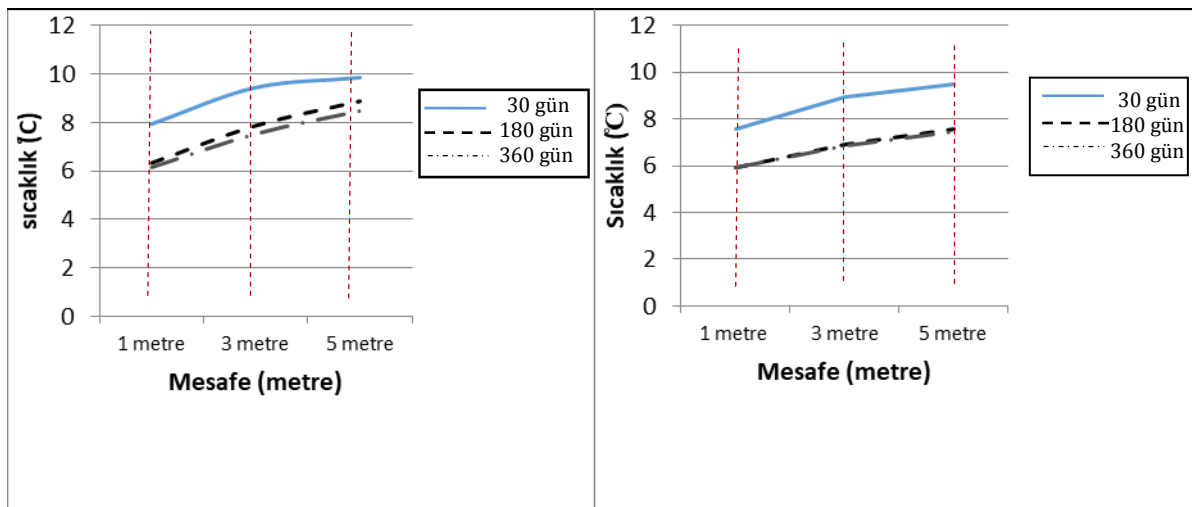
$$\eta(\%) = \frac{|T_y - T_o|}{T_o} \times 100 \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte T_y yeraltı suyu mevcutken elde edilen sıcaklık değerini, T_o ise yeraltı suyu bulunmayan zemin profili için elde edilen sıcaklık değerini ifade etmektedir. Tablo 4.3'te kazık ekseninden 1 m, 3 m ve 5 m uzaklıklar için elde edilen η değerleri sunulmaktadır.

Tablo 4.3. Kış modu için elde edilen ısı yayılım parametreleri

Zaman	η (%)		
	1 metre	3 metre	5 metre
30 gün	4,74	5,47	3,9
180 gün	6,74	13,56	16,99

Tablo 4.3 incelendiğinde, en yüksek ısı yayılım parametresinin 180. günde ve kazık merkezine 5 m uzakta elde edildiği görülmektedir.

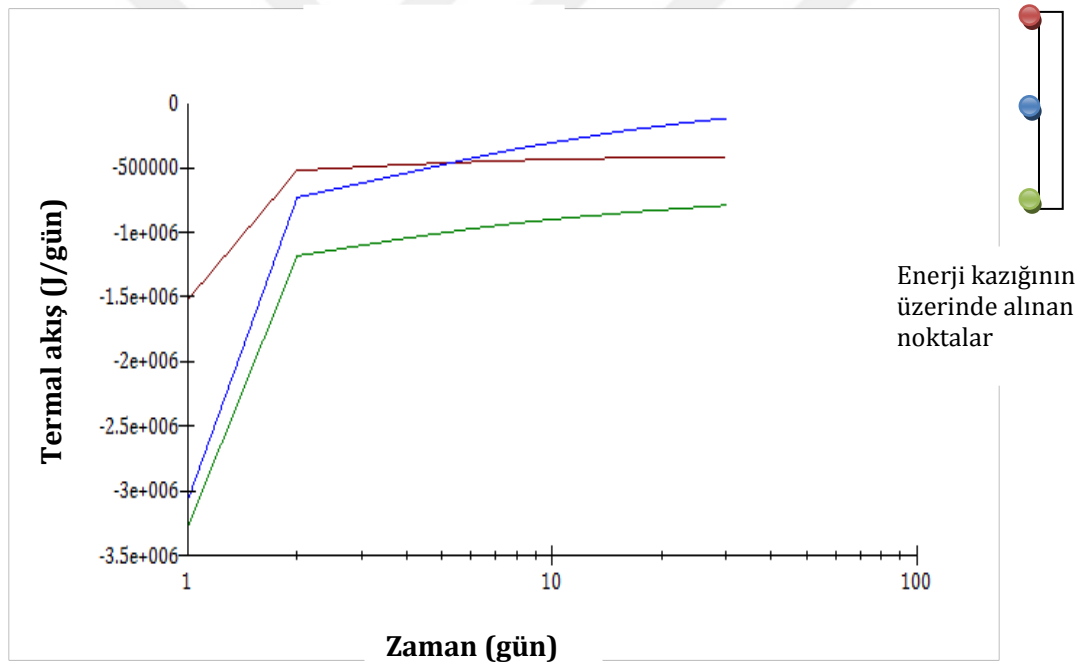


Şekil 4.6. a) Yeraltı suyunun bulunmadığı ve b) yeraltı suyunun bulunduğu analizlerde 30 gün, 180 gün ve 360 gün sonunda sıcaklığın kazık ekseninden ölçülen mesafelere bağlı olarak değişimi

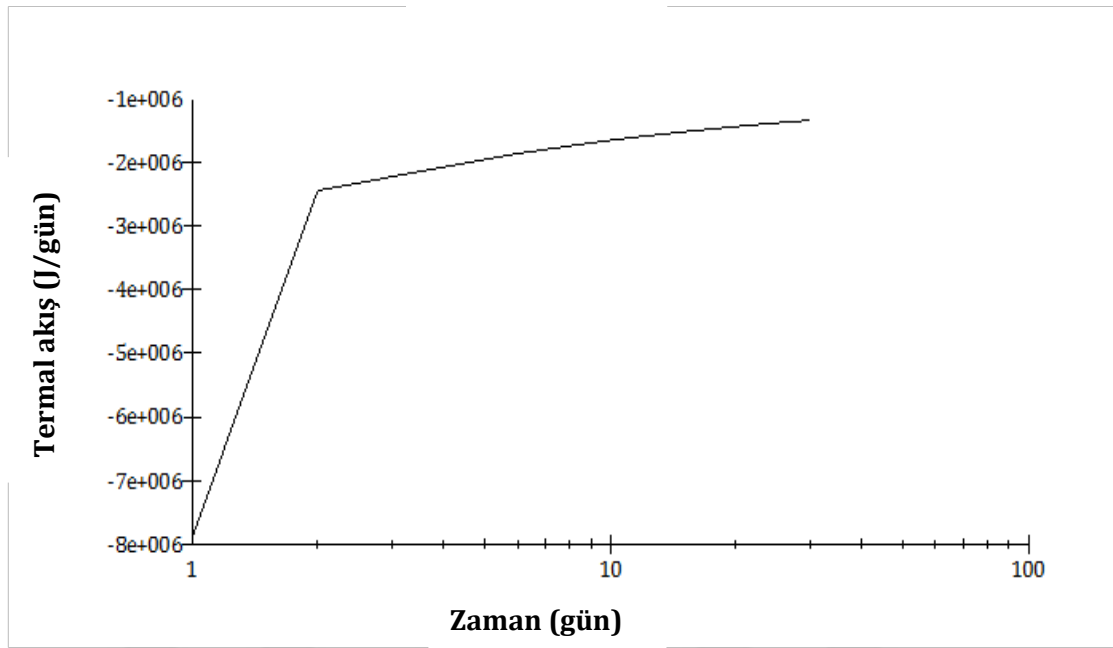
Şekil 4.6'da verilen grafikler incelendiğinde, yeraltı suyunun analize eklenmesiyle birlikte zemin sıcaklıklarında kış dönemi kullanımı için azalım görülmektedir (Şekil 4.6). Kazıktaki akışkan sıvıyla zemin arasında ısı alışverişi gerçekleşmekte ve zemin soğutulmaktadır.

Yeraltı suyunun enerji kazıklarının performansına etkisinin zemin sıcaklık dağılımları yönünden ele alınmasının yanı sıra, elde edilebilecek teorik enerji (watt) değerleri yönünden de karşılaştırma yapılabilir. Modellenen enerji kazığı üzerinde seçilen üç nokta için (kazığın en üst noktası, orta noktası ve uç noktası) için termal akı değeri Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Kazık uzunluğu boyunca toplam termal akı ise Şekil 4.8'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, enerji kazığında gerçekleşen ısı transferi ile sağlanabilecek termal akının zamana bağlı olarak azaldığı ve yaklaşık olarak 30. günden itibaren sabit olarak devam ettiği görülmektedir.

Kesit analizde, en yüksek enerji değeri kazığın uç noktasında elde edilirken, kazığın üst noktasında sınır koşuluna yaklaşıldığı için termal akı değerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Kış dönemi kullanımı için kazık üzerindeki üç nokta için termal akı değerleri



Şekil 4.8. Kış dönemi kullanımı için kazık boyunca ortalama termal akı değerleri

Sistemin çalışma başlangıcındaki akı değerini baz alarak zamana bağlı olarak gözlenen yeni akı değerleri arasındaki farkın ilk akı değerine bölünmesiyle enerji verimlilik yüzdesi (ε) değeri tanımlanmış olup aşağıdaki eşitlik ile bulunmaktadır:

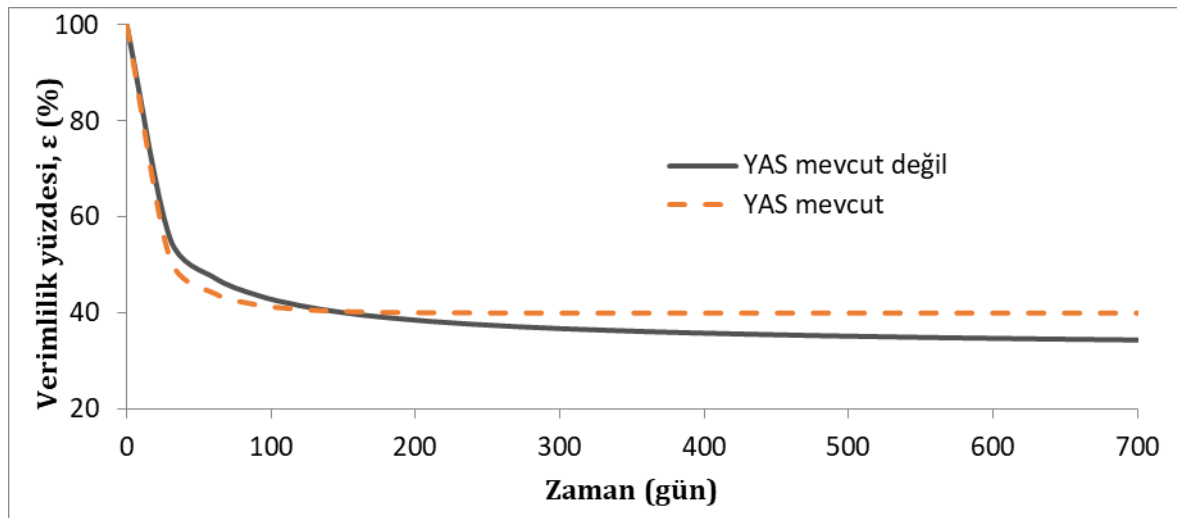
$$\varepsilon(\%) = \frac{|E(t=0) - E(t)|}{E(t=0)} \times 100 \quad (4.9)$$

Tablo 4.4' te belirtilen enerji verim yüzdesi değerleri incelendiğinde verim değerlerinin zamana bağlı olarak azaldığı izlenmektedir. 720 gün sonunda yeraltı suyu mevcut olmayan zeminde yer alan tekil enerji kazığı için %34 verim elde edilirken, aynı özelliklere sahip enerji kazığının akış hızı 0,16 m/gün olarak kabul edildiği bir akifer içerisinde bulunması durumunda verim değeri yaklaşık %40 'a ulaşmıştır.

Tablo 4.4. Kış dönemi kullanımında kesit analize göre tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim yüzdesi

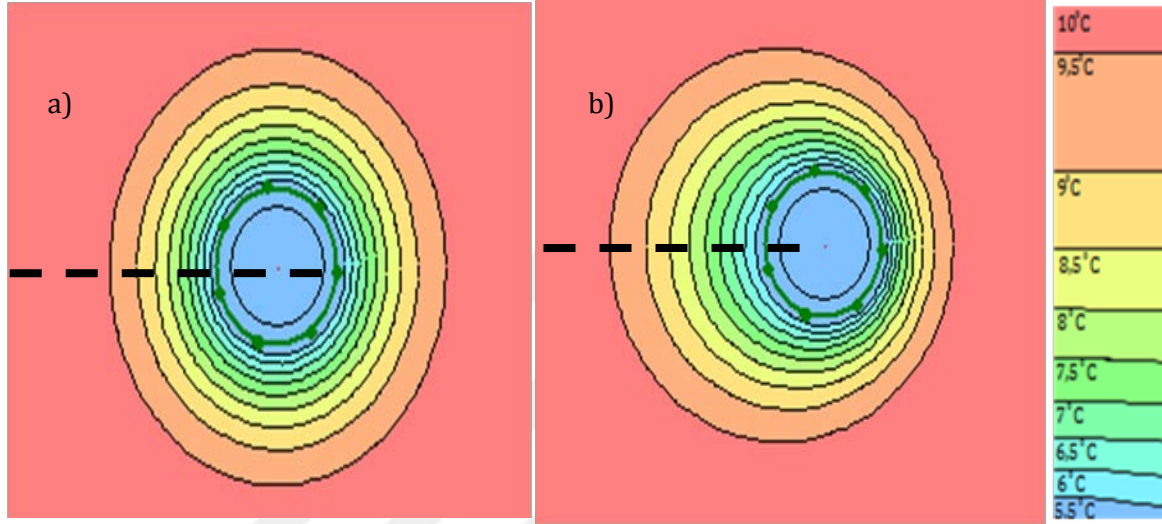
Zaman (gün)	Verimlilik Yüzdesi (%)	
	Yeraltı suyu mevcut değil	Yeraltı suyu mevcut
0	100	100
30	55,51981	51,27539
60	47,47347	44,17441
90	43,72045	41,72111
120	41,52390	40,73457
150	40,07111	40,31102
180	39,03412	40,12333
210	38,25389	40,03870
240	37,64361	40,00010
270	37,15168	39,98234
300	36,74554	39,97408
330	36,40358	39,97019
360	36,11092	39,96832
390	35,85696	39,96740
420	35,63399	39,96692
450	35,43622	39,96666
480	35,25926	39,96650
510	35,09969	39,96641
540	34,95481	39,96634
570	34,82250	39,96630
600	34,70099	39,96626
630	34,58888	39,96623
660	34,48498	39,96621
690	34,38832	39,96620
720	34,29160	39,96619

Sistemin çalışma başlangıcında verim %100 olarak kabul edilirse, bu değer zamana bağlı olarak azaldığı ve yeraltı suyunun bulunduğu analizde elde edilen son verim değerinin daha yüksek olduğu Şekil 4.9'da sunulan verim-zaman grafiğinde görülmektedir.

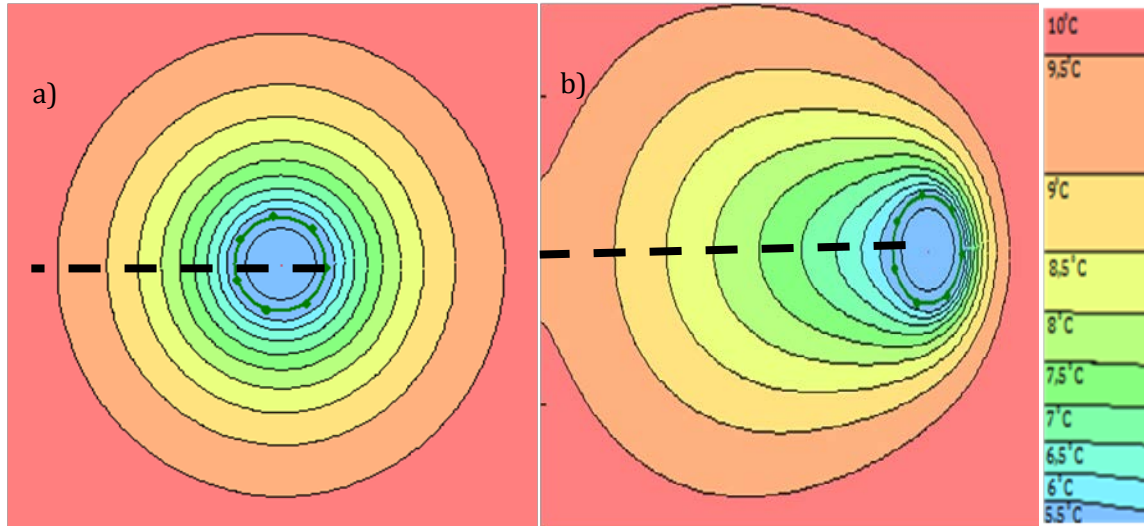
**Şekil 4.9.** Kış modunda tekil enerji kazığının kesit analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri

4.1.2.Kış Dönemi Kullanımında (Sığ Zeminden Isı Kazanımı) Tekil Enerji Kazığından Zemine Isı Yayılımının Modellenmesi (Plan Analiz)

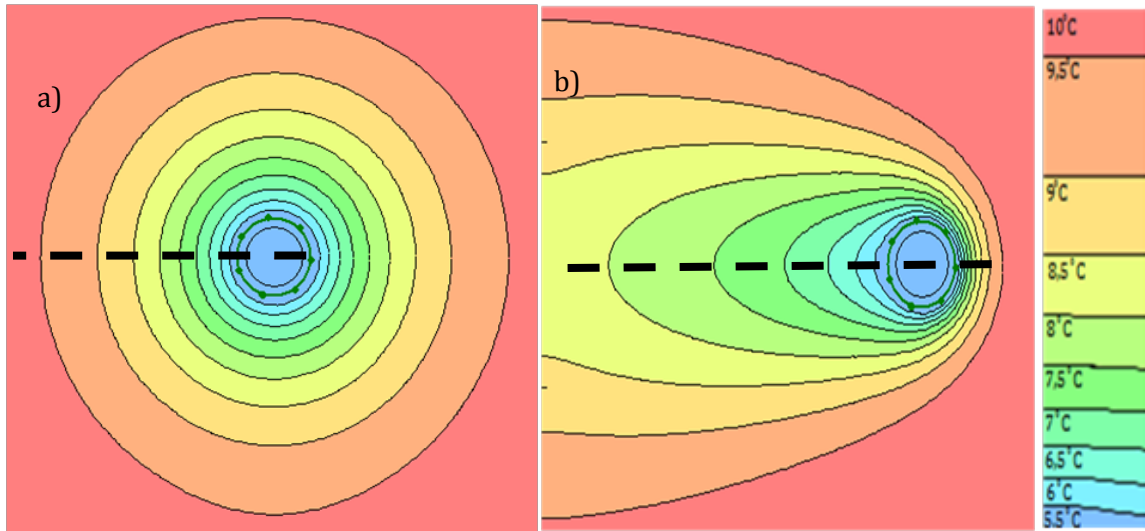
Tekil enerji kazığından zemine ısı yayılımının modellenmesi için yapılan plan analizde (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12) kesit model için uygulanan ortak parametreler kullanılmış, zemin hidrolik iletkenlik değeri 0,864 m/gün ve akiferdeki akış hızı 0,16 m/gün olarak alınmıştır.



Şekil 4.10. a) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

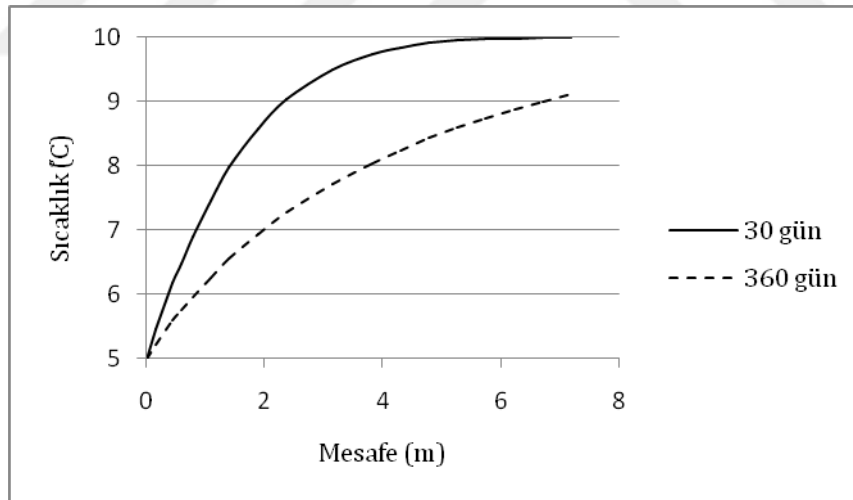


Şekil 4.11. a) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

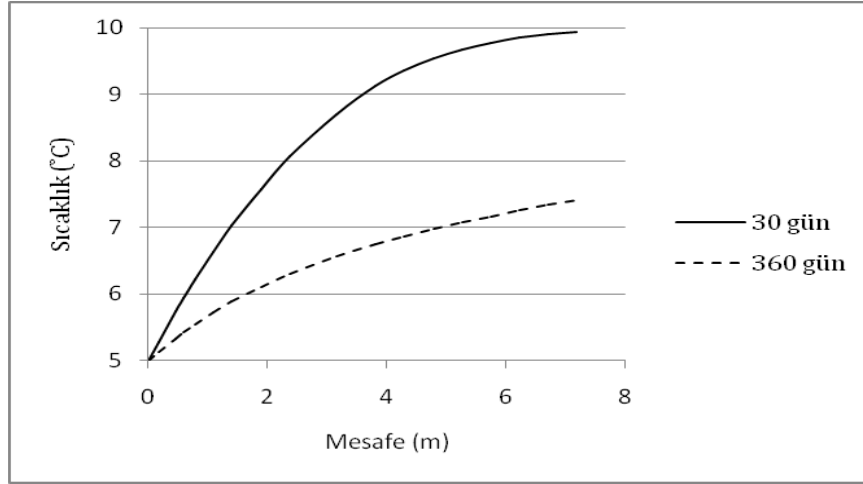


Şekil 4.12. a) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

Sıcaklık konturları incelendiğinde plan analiz için akiferdeki akış yönüne bağlı olarak sıcaklık konturlarının akış yönünde hareket ettiği görülmektedir. Enerji kazığının kesit merkezinden sol tarafa doğru alınan bir kesit için elde edilen Sıcaklık-Mesafe grafikleri incelenen her iki durum için, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

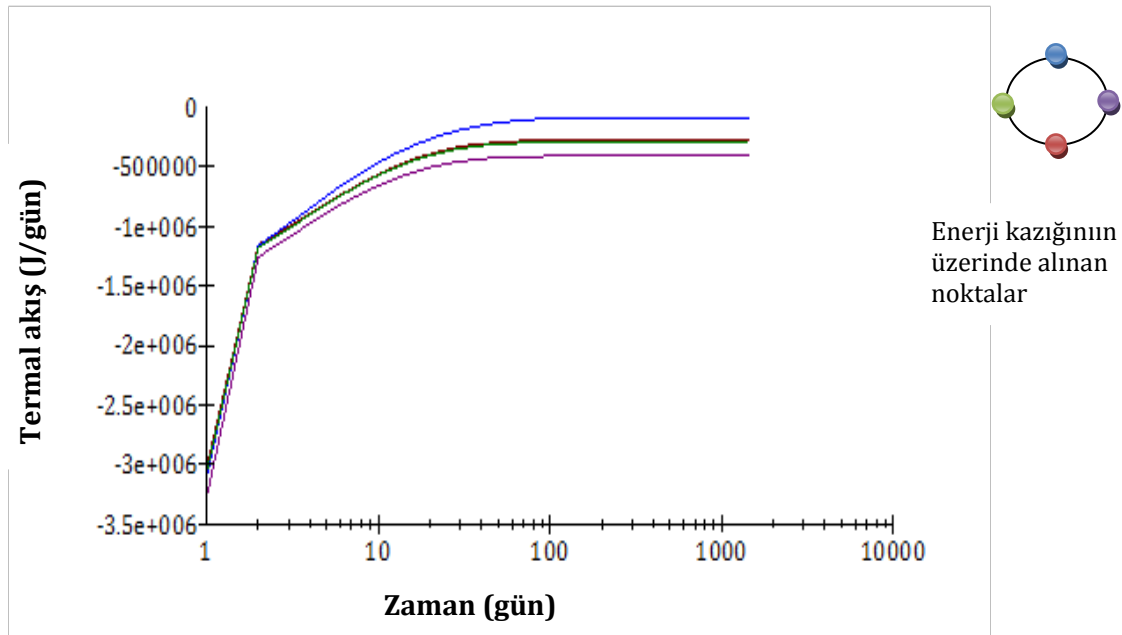


Şekil 4.13. Kış dönemi kullanımında 30 gün ve 360 gün sonunda kazık merkezinden sol tarafa doğru alınan kesit üzerindeki zemin sıcaklıkları (YAS mevcut değil)

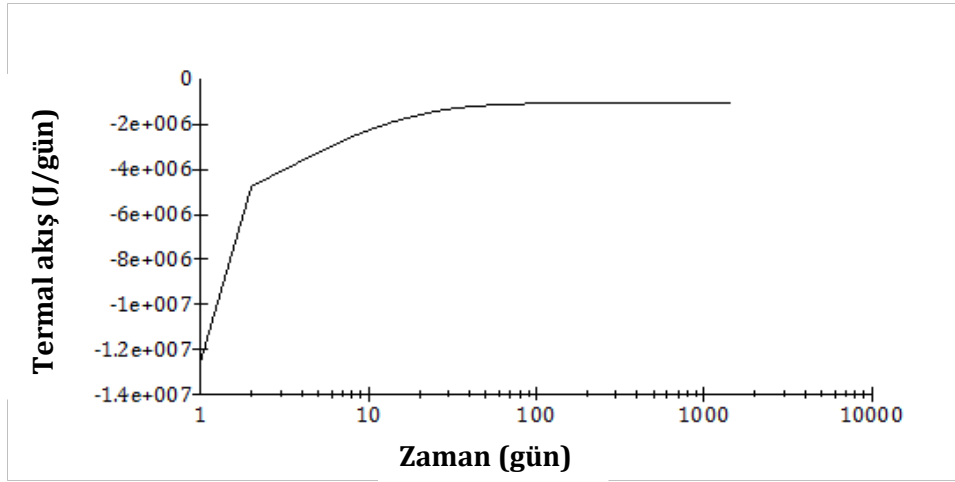


Şekil 4.14. Kış dönemi kullanımında 30 gün ve 360 gün sonunda kazık merkezinden sol tarafa doğru alınan kesit üzerindeki zemin sıcaklıkları (YAS mevcut)

Grafikler incelendiğinde yeraltı suyunun bulunmadığı analizde zemin bünyesindeki sıcaklık değerleri daha yüksek seyretmekte iken yeraltı suyunun bulunduğu analizde kazığın sol tarafındaki kalan zeminde, yeraltı suyu akımının etkisiyle zemin sıcaklıklarındaki düşüşün daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda enerji kazığının çevresinde seçilen dört nokta için ve bütün kazık çevresi için elde edilen ortalama termal enerji akı değerleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Kazık üzerinde belirlenen dört noktadan elde edilen termal akı değerleri incelendiğinde bu noktalardaki değerlerin zamana bağlı olarak azalan oranda bir artış trendi sergilediği görülmektedir. Kazık çevresi için ortalama termal akı değerlerinin de benzer şekilde davranış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.15. Kış modunda tekil enerji kazığının plan analizinde kazık çevresindeki dört noktanın termal akış- zaman eğrisi

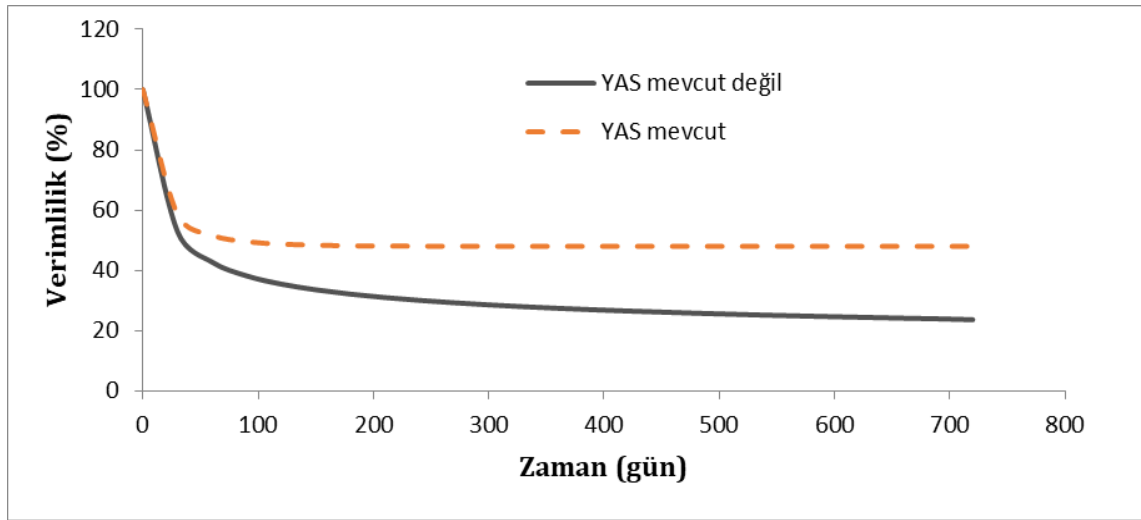


Şekil 4.16. Kış modunda tekil enerji kazığının plan analizinde kazığın zamana bağlı ortalama termal akış değerleri

Tablo 4.5. Kışlık kullanım için yapılan plan analizde tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim değerleri

Zaman (gün)	Verimlilik (%)	
	YAS mevcut değil	YAS mevcut
0	100	100
30	52,88680	58,55118
60	42,72600	51,65808
90	38,15569	49,51569
120	35,43222	48,69485
150	33,53682	48,33284
180	32,10085	48,15805
210	30,95642	48,06874
240	30,01303	48,02144
270	29,21601	47,99579
300	28,52980	47,98162
330	27,93000	47,97370
360	27,39919	47,96923
390	26,92453	47,96668
420	26,49631	47,96522
450	26,10703	47,96437
480	25,75078	47,96388
510	25,42283	47,96359
540	25,11933	47,96343
570	24,83713	47,96333
600	24,57360	47,96327
630	24,32655	47,96323
660	24,09410	47,96321
690	23,87466	47,96320
720	23,58600	47,96319

Tablo 4.5' te sunulan değerler incelendiğinde, yeraltı suyu akışının bulunmadığı zemin ortamında yer alan enerji kazığı için belirlenen verim yüzdesi 720 gün sonunda yaklaşık %24'e düşerken, akiferde hareket eden yeraltı suyunun bulunması durumunda bu değer yaklaşık olarak %48 olarak tahmin edilmiştir. Plan analizde yeraltı suyunun bulunduğu durum için elde edilen verim yüzdesi kesit analizde yeraltı suyunun bulunduğu durumda elde edilen verim yüzdesinden daha fazladır. Plan analizde kazık boyu dikkate alınamadığından kazık alt ve üst noktalarındaki sınır koşulu durumları oluşmamakta bu nedenle plan ve kesit analiz için belirlenen verim değerlerinde bir miktar fark olduğu düşünülmektedir. Plan analiz sonucunda tekil enerji kazığında her iki durum için zamana bağlı verim değerleri Şekil 4.17'de sunulmuştur.

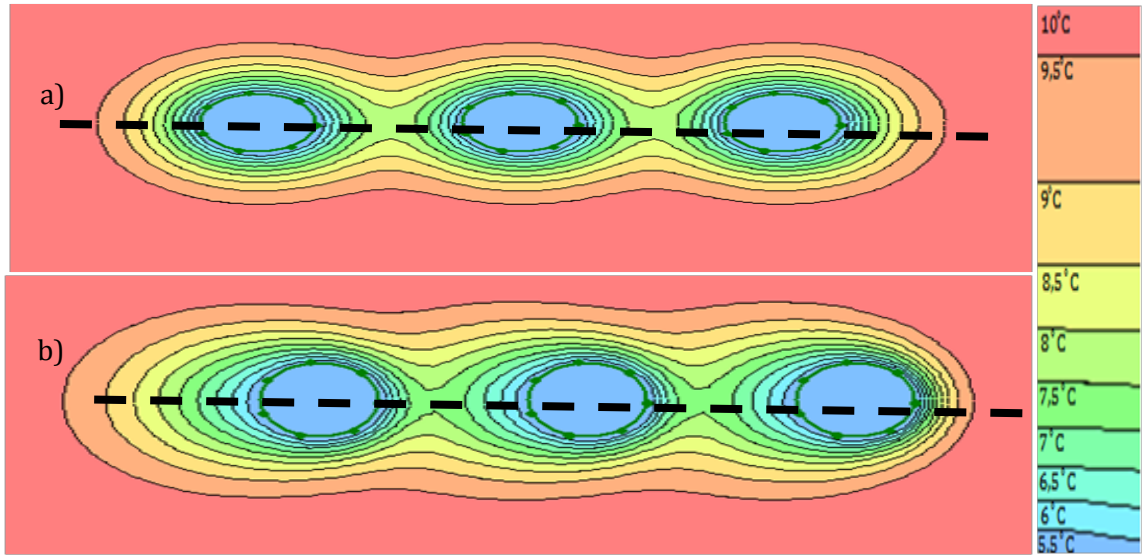


Şekil 4.17. Plan analiz sonucunda tekil enerji kazığında zamana bağlı verim değerleri

4.1.3. Kış Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılmının Modellenmesi (Akım yönüne paralel)

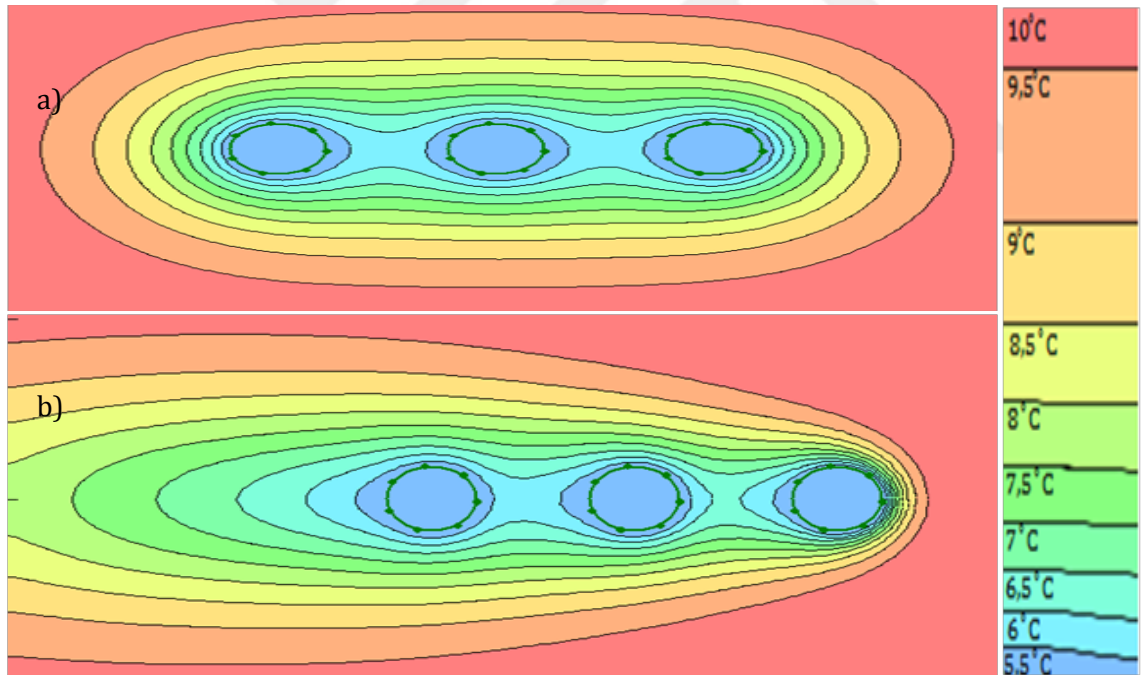
Tekil enerji kazığının plan ve kesit analizlerinden sonra, akiferdeki yeraltı suyu hareketine paralel ve dik yönde yerleştirilen kazık gruplarının plan ve kesit analizleri yapılarak kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) grup kazıkların verimlilik yüzdeleri karşılaştırılmıştır.

İlk aşamada yeraltı suyu akım yönüne paralel tarzda 2 sıra halinde üçerli enerji kazık grubunun analizi ele alınmıştır. Yapılan analizde yer alan tüm kazıkların termal iletkenlik değerleri, hidrolik iletkenlik değerleri aynıdır ve programda kullanılan sabit parametreler Tablo 4.1'de verilmektedir. Kazıkların merkezden merkeze aralıkları 8 metre olarak kabul edilmiştir.

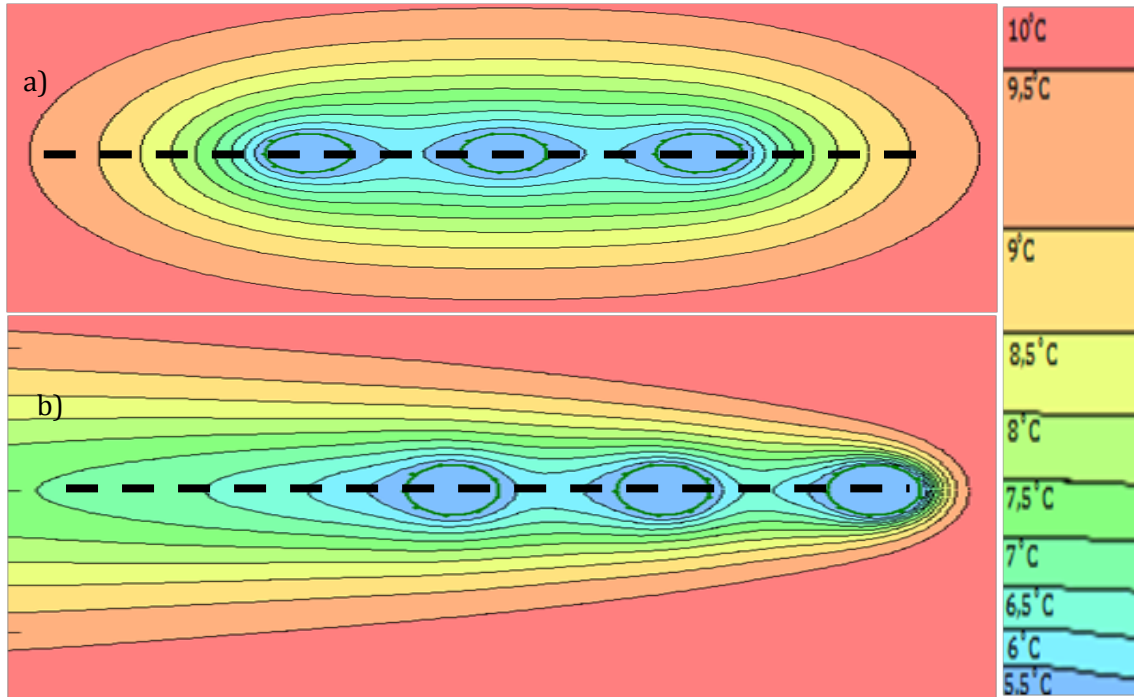


Şekil 4.18. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

Analizde kullanılan zemin hidrolik iletkenlik değeri 0,864 m/gün ve yeraltı suyu akış hızı 0,16 m/gün olarak programa girilmiştir.



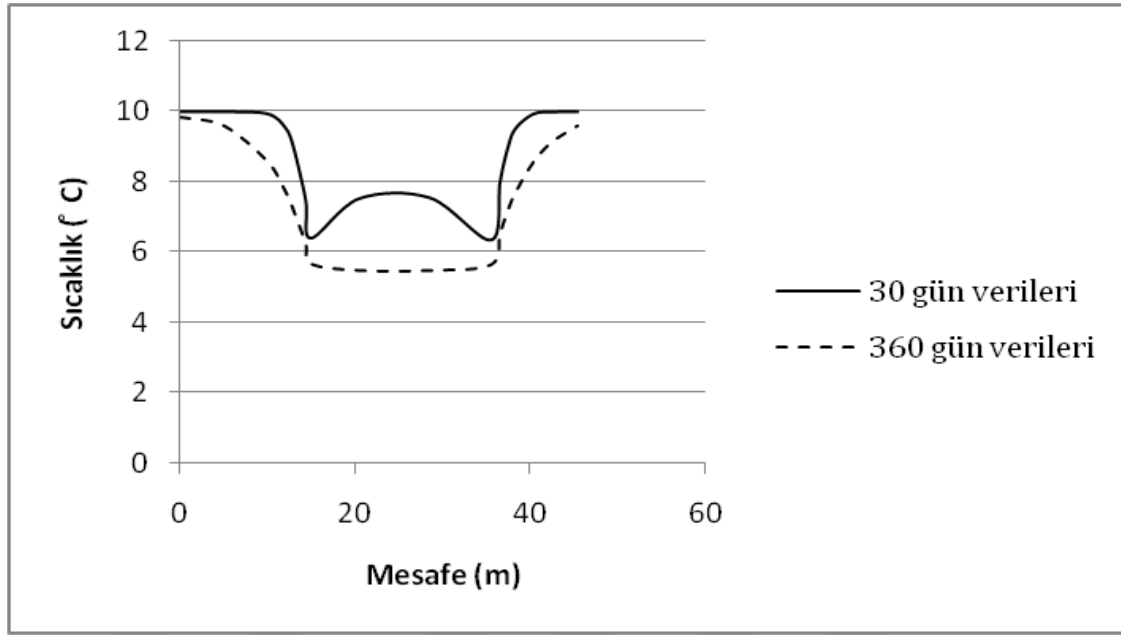
Şekil 4.19. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



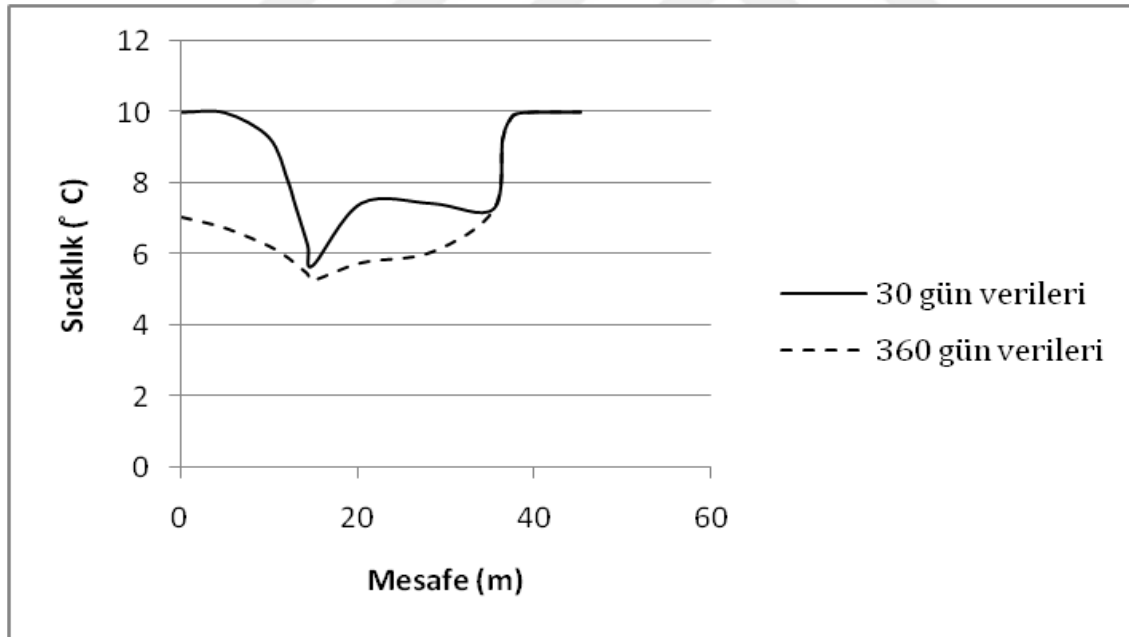
Şekil 4.20. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

30 gün ve 360 gün sonunda elde edilen analiz sonuçlarına göre, kazık merkez ekseninden alınan yatay bir kesit boyunca sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de görüldüğü gibi zemin içerisinde noktalar alındığında; gerek yeraltı suyunun bulunmadığı durum için gerekse yeraltı suyunun bulunduğu durum için mesafeye bağlı olarak zemin sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde, zeminde yeraltı suyu akışının bulunmadığı durumda kazık gövdesinden homojen ısı yayılımı nedeniyle zemin sıcaklık profili merkeze göre simetrik bir formda oluşmaktadır. Yeraltı suyu akımının mevcut bulunduğu Şekil 4.22’de ise enerji kazığı ve zemin arasından gerçekleşen ısı transferi nedeniyle oluşan sıcaklık farklarının akım yönünde genişleme eğiliminde olduğu rahatlıkla gözlenmektedir.

Şekiller incelendiğinde, kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) yeraltı su akımı olan durumda kazık grubunun yaklaşık olarak 10 metre sol tarafında kalan kesitte zemin sıcaklıkları bir yıllık kesintisiz çalışma sürecinde zamana bağlı olarak giderek azalmakta ve kazık gövdesi ile yakın sıcaklık değerlerine inmektedir. Yeraltı suyunun olmadığı ya da statik durumda olduğu durumda zeminde gözlenen sıcaklık değerleri daha yüksek seviyelerde kalmaktadır. Bu durumun termal enerji çıkarma verimliliğine etkisi olacağı öngörülmektedir.

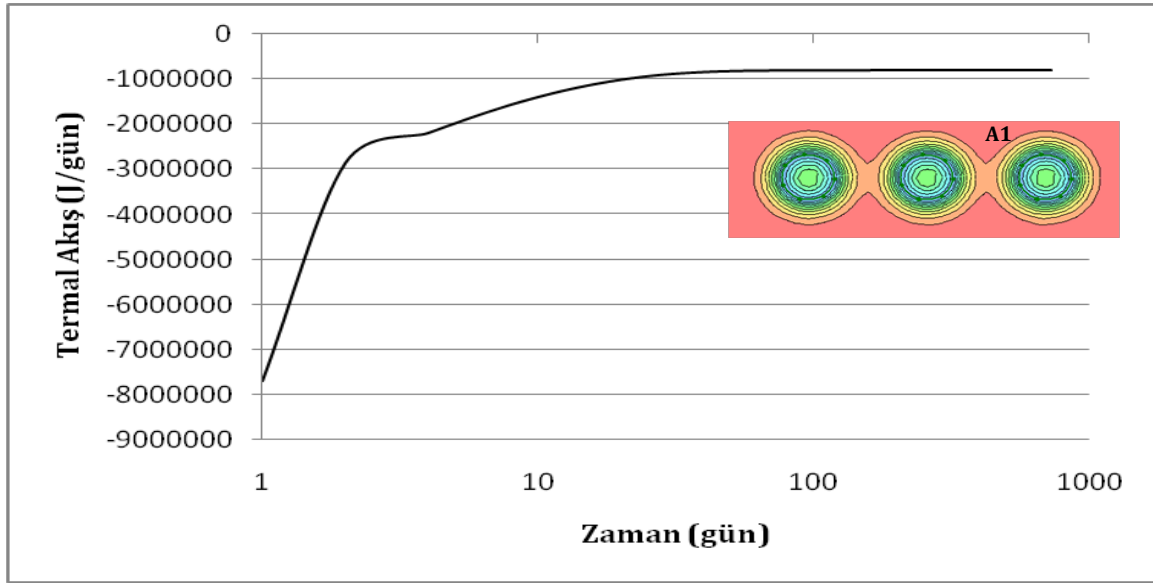


Şekil 4.21. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık- mesafe profilleri (YAS mevcut değil)

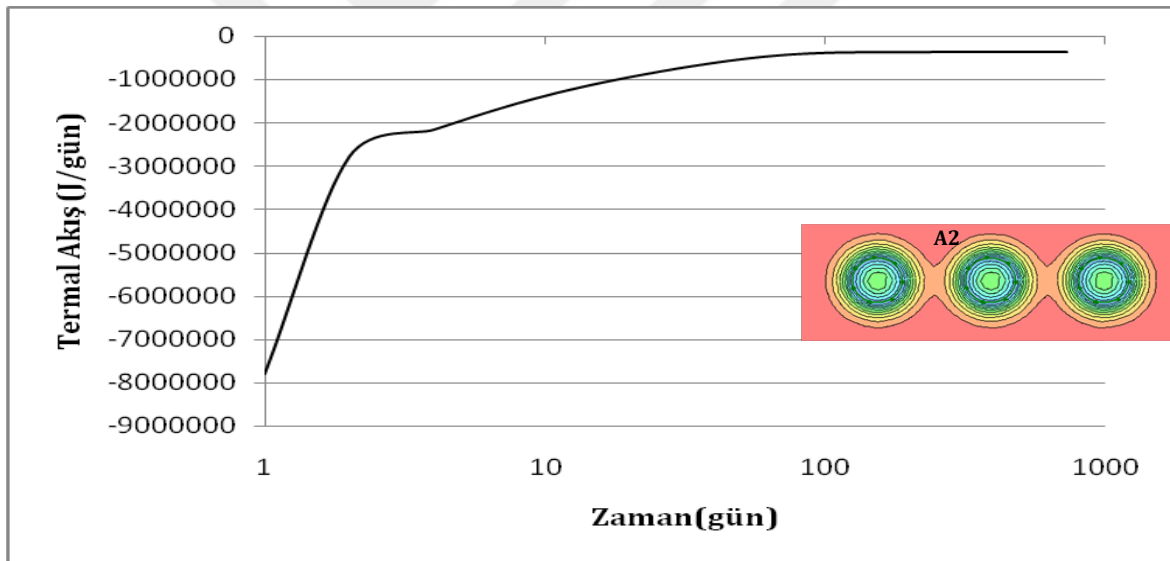


Şekil 4.22. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık- mesafe profilleri (YAS mevcut)

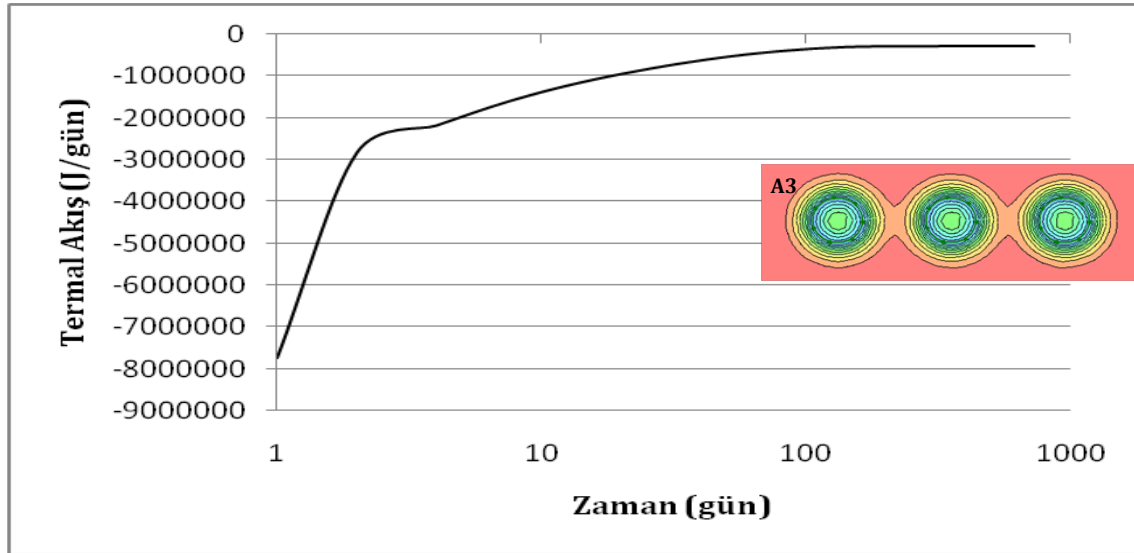
Analizler neticesinde kazık grubunda yer alan enerji kazıklarından her biri için oluşturulan zamana bağlı ortalama enerji değerleri grafikleri Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te sunulmaktadır.



Şekil 4.23. Gruptaki A1 kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.24.Gruptaki A2 kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.25. Gruptaki A3 kazığı için termal akı- zaman grafiği

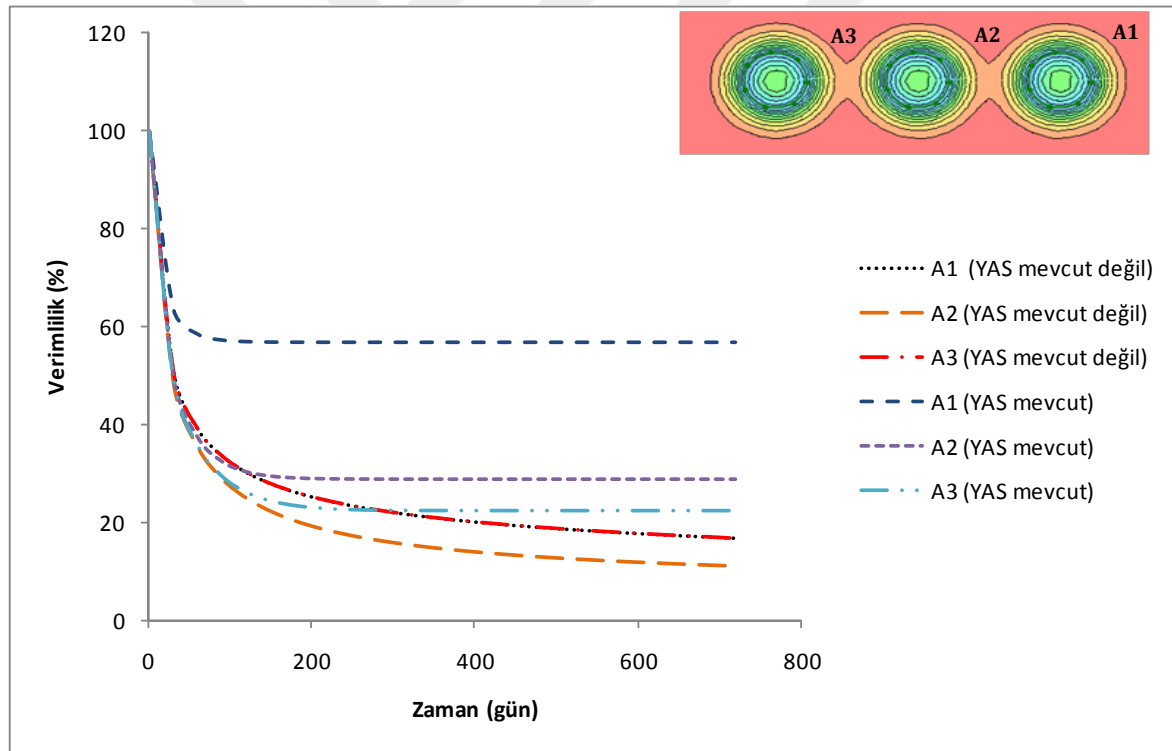
Grafikteki değerlere göre en yüksek enerji değeri birinci kazıktan elde edilirken en düşük enerji değeri üçüncü kazıktadır.

Tablo 4.6. Akım yönüne dik konumlandırılan grupta verimlilik değerleri (plan analiz)

Zaman (gün)	Verimlilik (%)					
	Yeraltı suyunun bulunmadığı analiz			Yeraltı suyunun bulunduğu analiz değerleri		
	1.kazık (A1)	2.kazık (A2)	3.kazık (A3)	1.kazık (A1)	2.kazık (A2)	3.kazık (A3)
0	100	100	100	100	100	100
30	50,52879	48,15846	50,54191	63,37668	49,30514	48,91493
60	38,94081	35,12031	38,95651	58,39655	37,0918	35,59905
90	33,43325	28,65852	33,44471	57,22096	32,20071	29,40999
120	30,09335	24,714	30,10232	56,90778	30,13565	26,1843
150	27,78587	22,02639	27,79346	56,81742	29,26509	24,44159
180	26,06676	20,06962	26,07351	56,78975	28,90318	23,49968
210	24,72154	18,57813	24,72772	56,78087	28,75501	22,99962
240	23,63119	17,40116	23,63695	56,77793	28,69518	22,74106
270	22,72342	16,44651	22,72887	56,77693	28,6713	22,61121
300	21,95155	15,6547	21,95675	56,77659	28,66186	22,54785
330	21,28394	14,98578	21,28894	56,77647	28,65816	22,51776
360	20,69838	14,41193	20,7032	56,77642	28,65672	22,50381
390	20,17873	13,91325	20,18341	56,77641	28,65617	22,49749
420	19,71297	13,47509	19,71752	56,7764	28,65595	22,49467
450	19,29194	13,08644	19,29637	56,7764	28,65587	22,49345
480	18,90849	12,73884	18,91283	56,7764	28,65584	22,49292
510	18,55699	12,4257	18,56123	56,7764	28,65583	22,49269
540	18,23289	12,14178	18,23705	56,7764	28,65582	22,4926
570	17,93251	11,88288	17,93659	56,7764	28,65582	22,49256
600	17,65281	11,64557	17,65682	56,7764	28,65582	22,49254
630	17,39126	11,42704	17,39521	56,7764	28,65582	22,49254
660	17,14575	11,22494	17,14964	56,7764	28,65582	22,49253
690	16,91449	11,03732	16,91832	56,7764	28,65582	22,49253
720	16,68323	10,84971	16,63791	56,7764	28,65582	22,49253

Tablo 4.6 'daki değerler incelendiğinde, akım yönüne paralel olarak sıralanan kazıklarda yeraltı suyunun bulunduğu analizlerde elde edilen termal verim değerlerinin yeraltı suyu bulunmayan zemin ortamında yer alan kazıkların verim değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.26' da görüldüğü üzere, incelenen kazık grubu için kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) en yüksek verim, yeraltı suyunun bulunduğu analizde birinci kazık (A1) için , en düşük verim ise yeraltı suyunun bulunmadığı analizdeki ikinci kazık (A2) için elde edilmektedir. Yeraltı suyunun bulunmadığı analizde en düşük verime ikinci kazığın sahip olmasının sebebi, ikinci kazığın hem ikinci hem de ilk kazıkla etkileşim halinde olmasıdır. Yeraltı suyunun bulunduğu durumda ise zemin modelinde tanımlanan yeraltı suyu sağ kenarda olduğundan dolayı en verimli ve en etkili biçimde birinci kazığı etkilemekte, daha sonra kazıklardaki etkileşimlerden sonra en son üçüncü kazığa ulaşmaktadır. Bu sebeple en düşük değer üçüncü kazıktır.

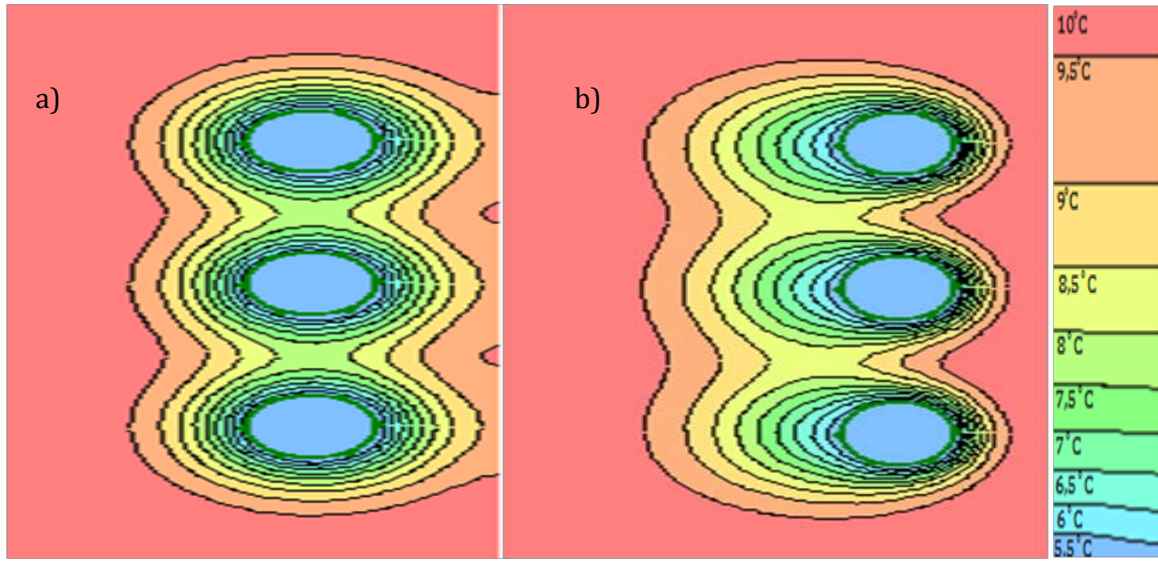


Şekil 4.26. Kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) plan analizinde akım yönüne paralel konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu olarak karşılaştırılması

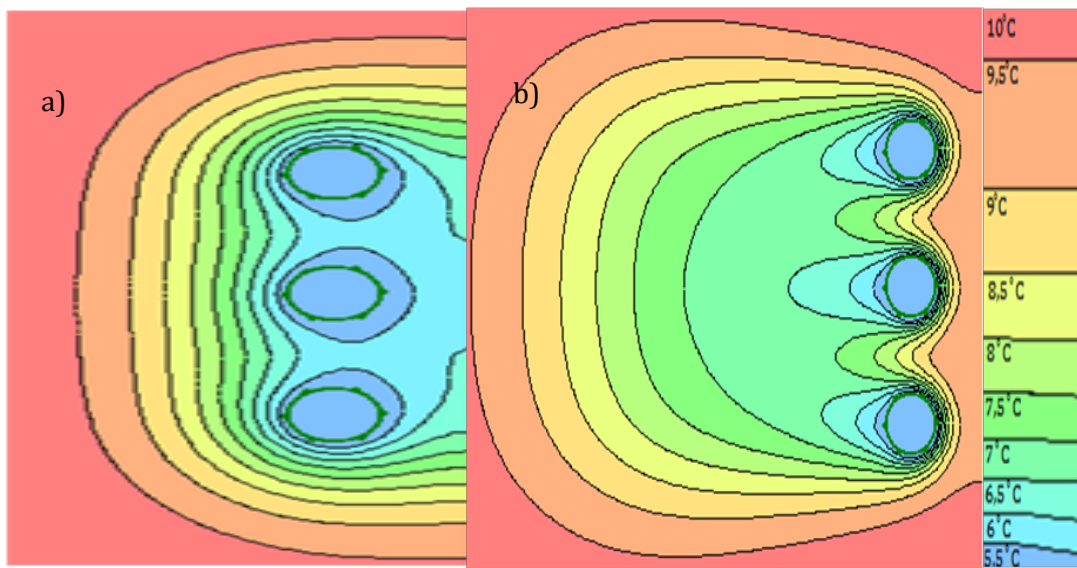
4.1.4. Kış Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılmının Modellenmesi (Akım yönüne dik yerleşim)

Akiferdeki akım yönüne dik olarak konumlandırılan üçlü enerji kazık grubunun plan analizleri yapılarak termal etkileşimler ve yeraltı suyunun enerji çıkarma potansiyeli üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu analiz grubunda kullanılan zemin hidrolik iletkenlik değeri 0,864 m/gün, akiferdeki yeraltı suyu akış hızı ise 0,16 m /gün olarak kabul edilmiştir.

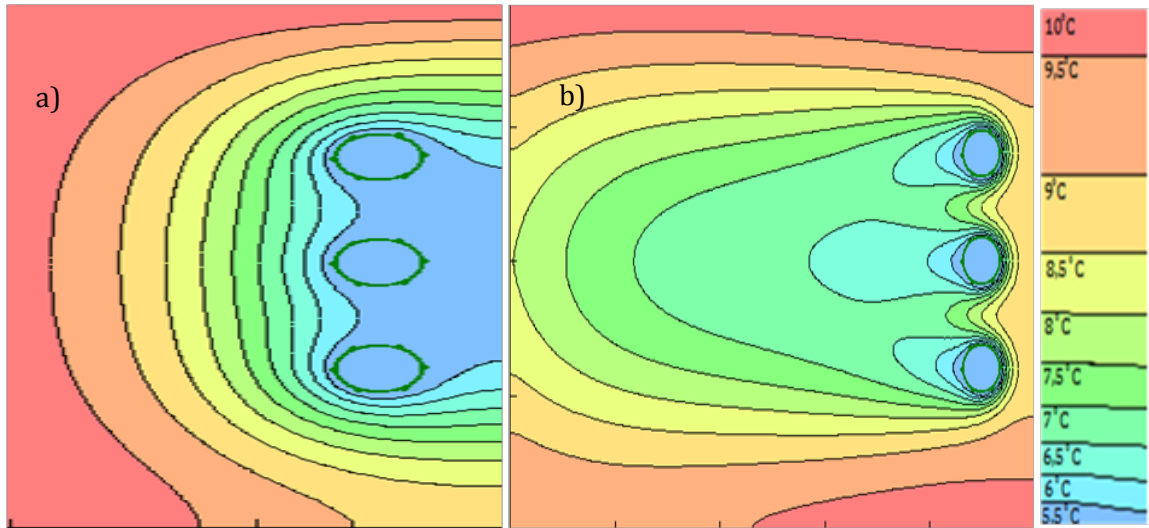
Bu analizde grubunda da öncekine benzer şekilde zemin içi sıcaklık değişimlerinin, akiferdeki yeraltı suyu akış yönüne bağlı olarak sol tarafa doğru taşındığı görülmüştür. (Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29).



Şekil 4.27. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

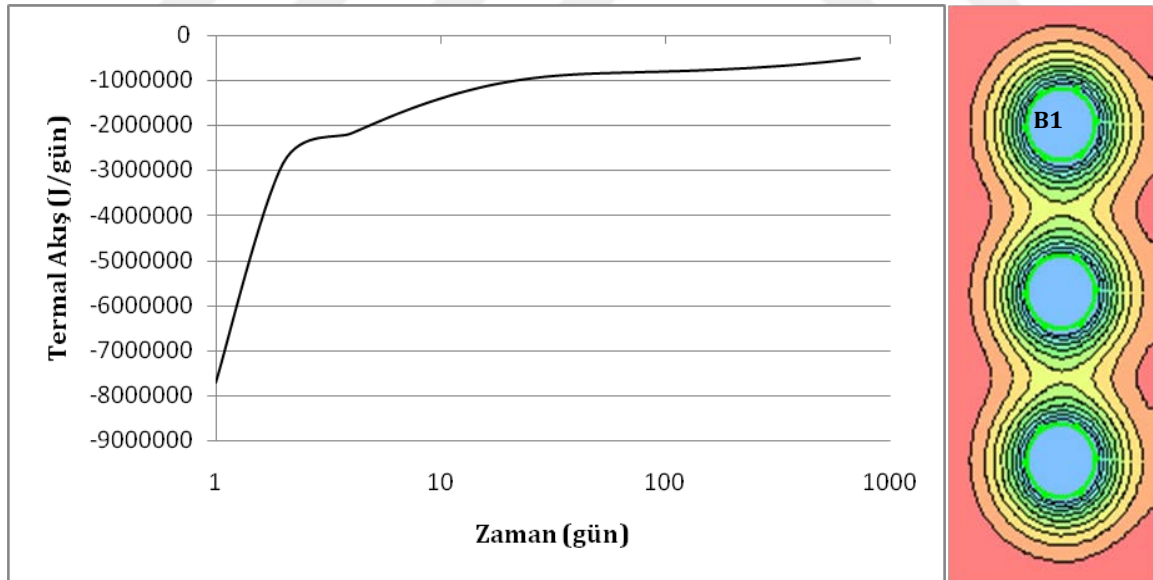


Şekil 4.28. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

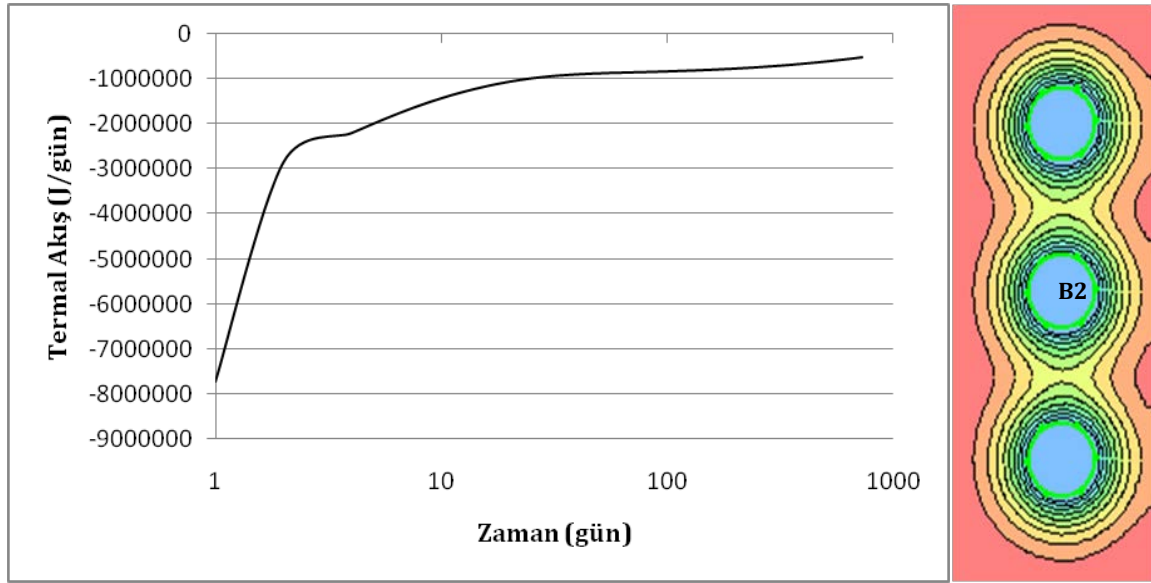


Şekil 4.29. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

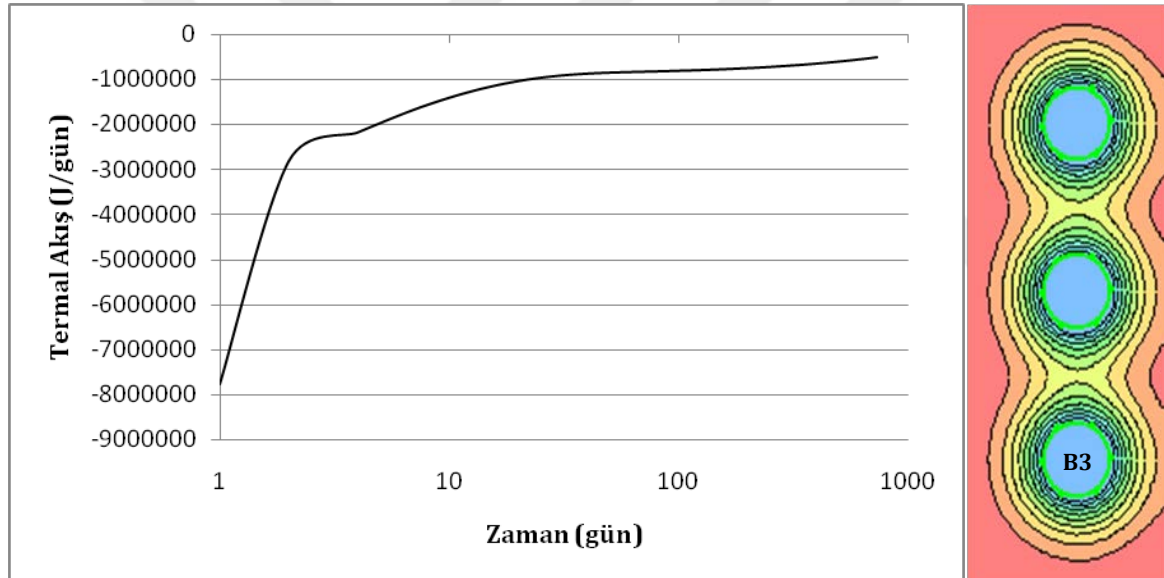
Sıcaklık değerlerinin yanı sıra, program çıktılarından elde edilen zamana bağlı termal akış değerleri incelendiğinde (Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32), grupta yer alan bütün kazıklar için termal akış değerlerinin zamana bağlı olarak azaldığı ve gözlenen azalma miktarlarının da eşit olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Gruptaki B1 kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.31. Gruptaki B2 kazığı için termal akı- zaman grafiği



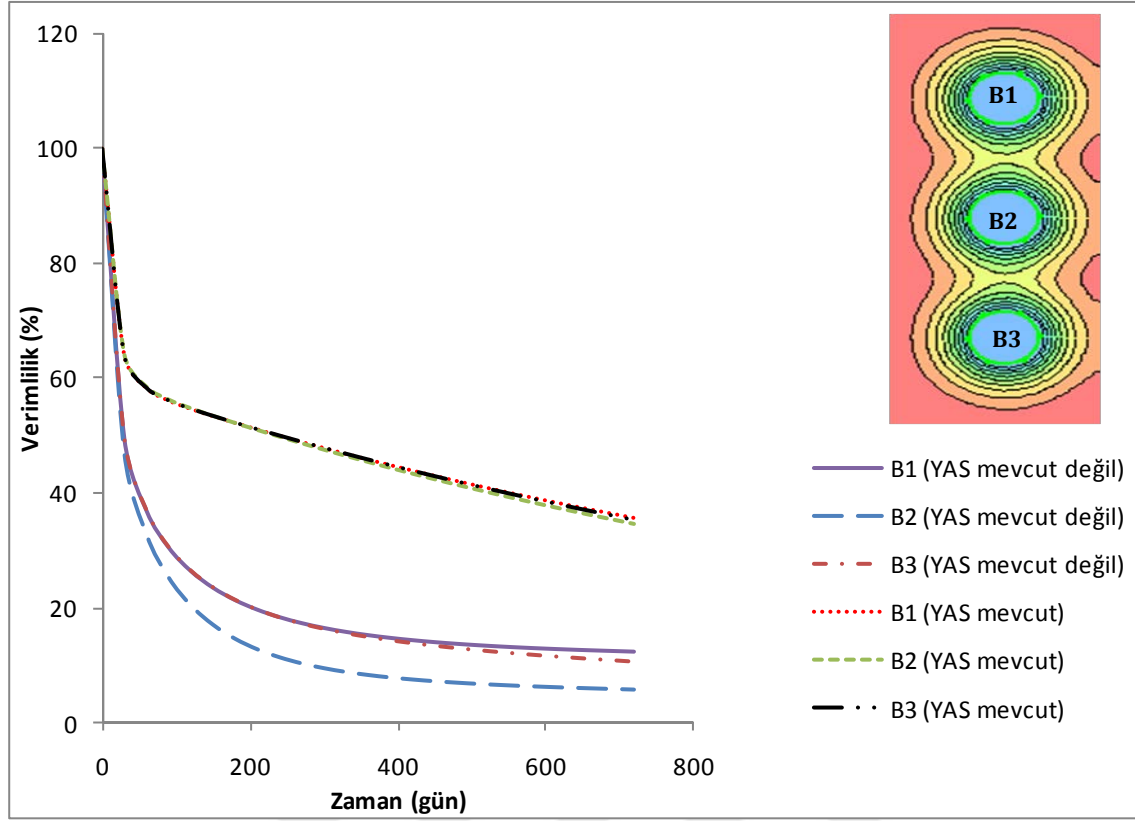
Şekil 4.32. Gruptaki B3 kazığı için termal akı- zaman grafiği

Tablo 4.7. Akım yönüne dik konumlandırılan grupta yer alan enerji kazıklarının verimlilik değerleri (plan analiz)

Zaman (gün)	Verimlilik (%)					
	YAS mevcut değil			YAS mevcut		
	1.kazık (B1)	2.kazık (B2)	3.kazık (B3)	1.kazık (B1)	2.kazık (B2)	3.kazık (B3)
0	100	100	100	100	100	100
30	49,57043	47,00765	49,57362	64,00024	64,200502	64,00357
60	37,01775	32,81101	37,02649	58,38163	58,56945	58,39525
90	30,61162	25,28288	30,61343	56,19339	56,334078	56,20953
120	26,51922	20,44532	26,50961	54,74794	54,828316	54,76614
150	23,6209	17,06679	23,59371	53,49926	53,51261	53,51872
180	21,46038	14,60972	21,40738	52,32273	52,265784	52,34222
210	19,80076	12,77946	19,71215	51,1874	51,059083	51,20534
240	18,49908	11,39205	18,36402	50,08455	49,885201	50,09908
270	17,4613	10,32445	17,26856	49,01109	48,741913	49,02008
300	16,6224	9,491187	16,36086	47,96548	47,62818	47,96655
330	15,93594	8,83161	15,59502	46,94667	46,543216	46,93728
360	15,36797	8,302041	14,93798	45,95381	45,486274	45,93127
390	14,89326	7,870709	14,36556	44,98615	44,456606	44,94768
420	14,49275	7,514309	13,85992	44,04302	43,453456	43,98577
450	14,15188	7,215627	13,40771	43,12375	42,476074	43,04489
480	13,8594	6,961855	12,99888	42,22774	41,523718	42,12444
510	13,60652	6,743403	12,62579	41,3544	40,595661	41,22389
540	13,38633	6,553038	12,28256	40,50316	39,691195	40,34272
570	13,1933	6,385263	11,96463	39,67344	38,809632	39,48049
600	13,02304	6,235871	11,66845	38,86472	37,950305	38,63675
630	12,87197	6,101611	11,39116	38,07645	37,112571	37,81109
660	12,73719	5,979954	11,1305	37,30812	36,295806	37,00314
690	12,61632	5,868911	10,88462	36,5592	35,499413	36,2125
720	12,49545	5,757868	10,63874	35,8102	34,70302	35,4218

Yeraltı suyunun olmadığı durumdaki verim yüzdeleri incelendiğinde, yeraltı suyunun bu modellemeye de verimi arttırdığı görülmektedir (Tablo 4.7)

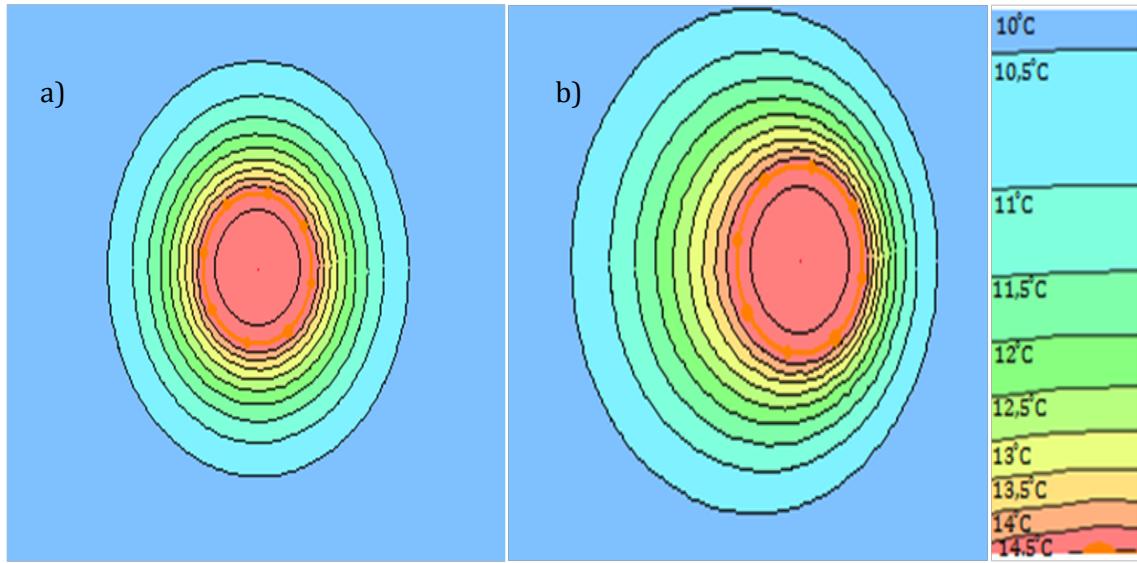
Şekil 4.33' teki grafikte de iki durum ve tüm kazıklar için, en düşük verimlilik yüzdesi ikinci kazıktadır.



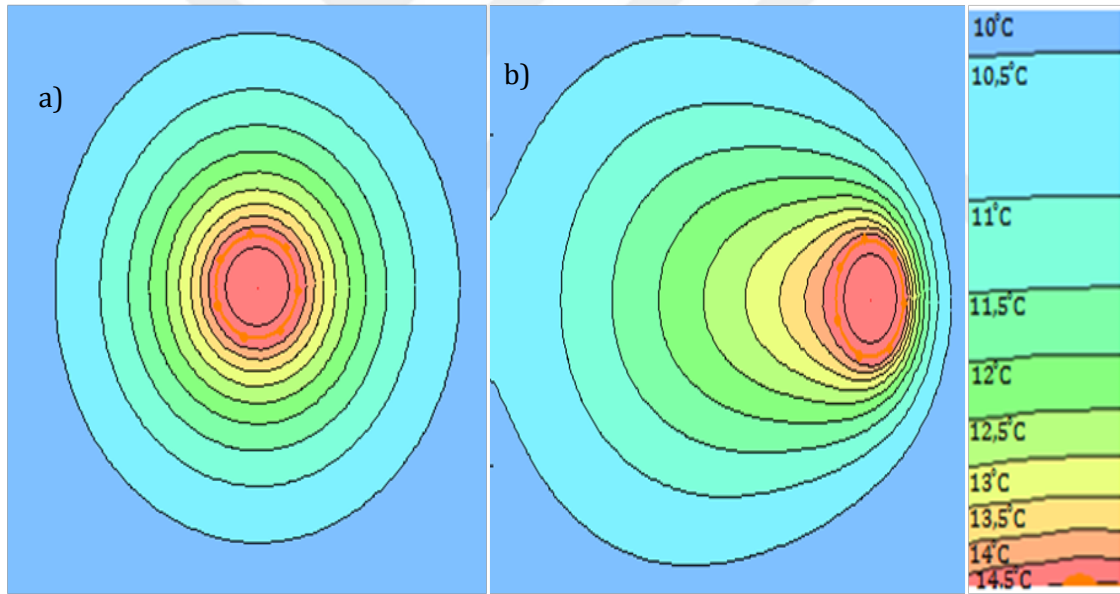
Şekil 4.33. Kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) plan analizinde akım yönüne dik konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu olarak karşılaştırılması

4.1.5. Yaz Dönemi Kullanımında (sığ zemine ısı enjeksiyonu) Tekil Enerji Kazığının Plan Analizi

Yaz Dönemi Kullanımını (sığ zemine ısı enjeksiyonu) modellemek için yapılan analizlerde önceki analizlerde alınan ortak değerlerin yanı sıra yeraltı suyu akış hız 0,16 metre/gün ve zemin hidrolik iletkenlik değeri 0,864 metre/gün olarak programa girilmiştir. Yaz modunda kazıdaki akışkan sıcaklığı 15°C olarak alınırken zemin sıcaklığı 10°C olarak kabul edilmiştir. Bu konfigürasyonda kazık gövdesi çevreleyen zemin ortamından daha sıcak olmakta ve zemine ısı salınımı söz konusu olmaktadır. Zemine ısı enjeksiyonu süreci için elde edilen zemin sıcaklık kesitleri Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 da gösterilmiştir. Yeraltı akımının mevcut olduğu analizlerde sıcaklık değişimlerinin akım yönünde taşındığı görülmektedir.

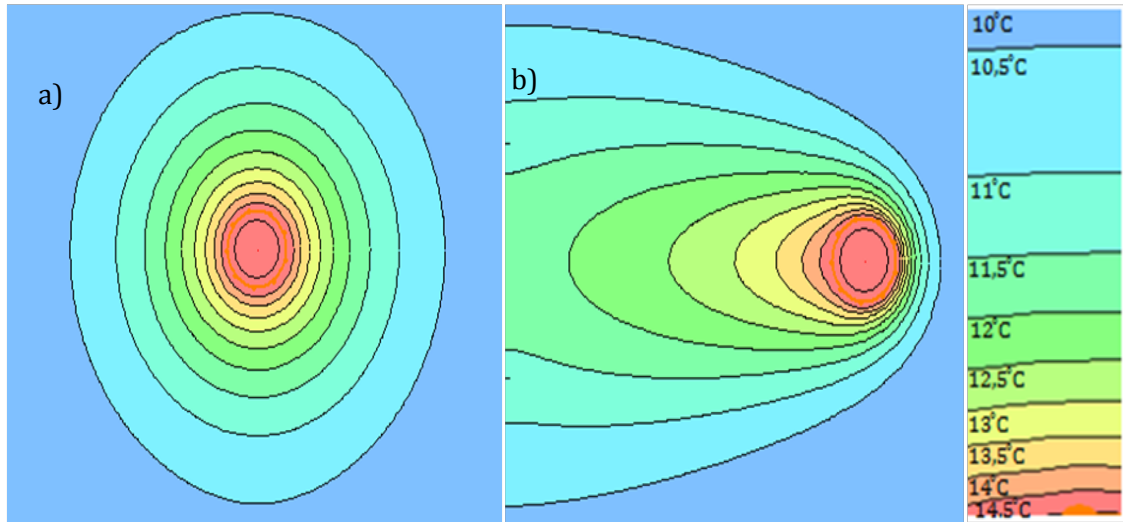


Şekil 4.34. a) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

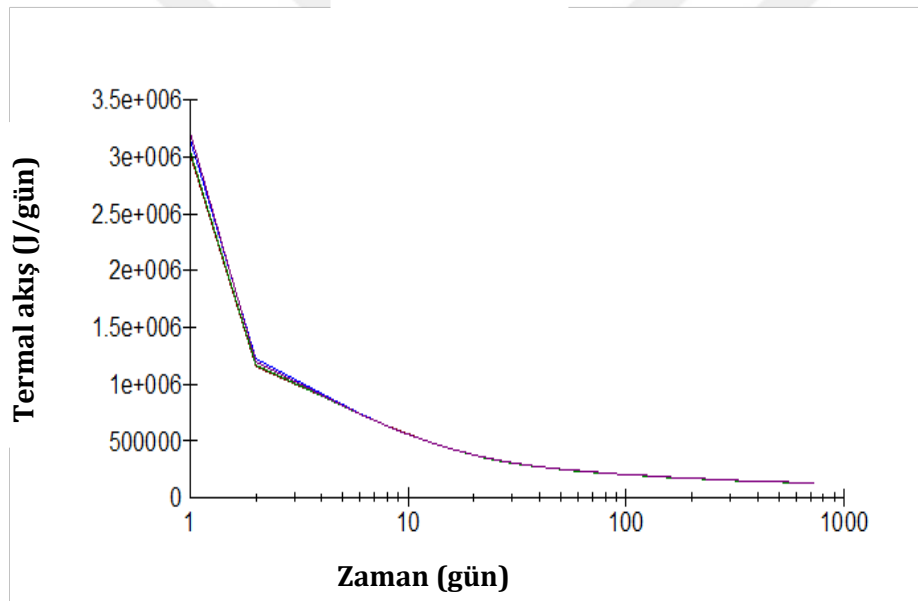


Şekil 4.35. a) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

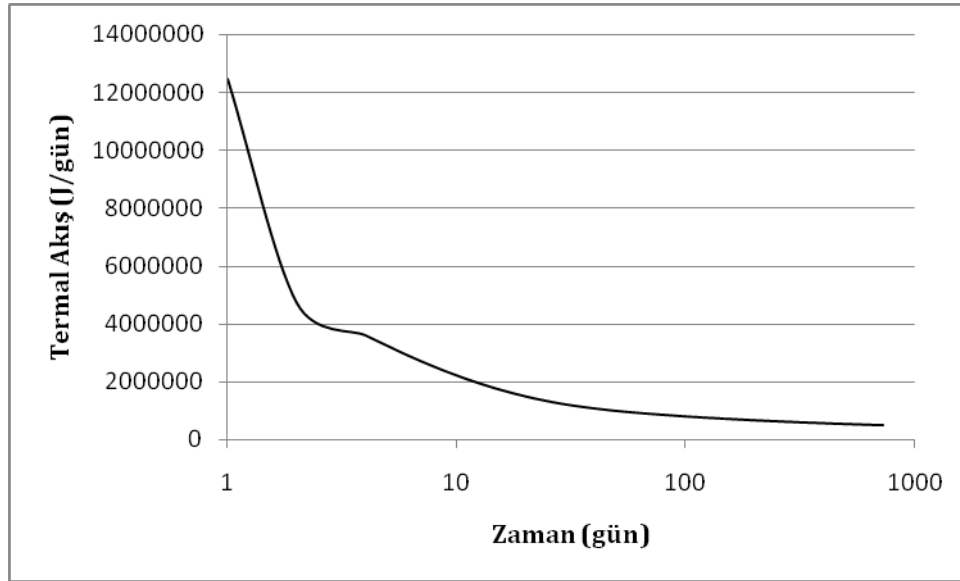
Şekil 4.37’de de görüldüğü üzere kazık üzerinde alınan dört noktanın da termal akış değeri zamana bağlı olarak azalmaktadır. Kış dönemi kullanımı modellemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerden farklı olarak, yaz modunda elde edilen termal akım değerlerinin pozitif olduğu görülmektedir. Bu durum, termal akış yönünün kazıktan zemine doğru yön değiştirmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.36. a) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki plan sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)



Şekil 4.37. Yaz modunda tekil enerji kazığının plan analizinde, kazık çevresindeki dört noktanın termal akış- zaman eğrisi



Şekil 4.38. Yaz dönemi kullanımı için kazık boyunca ortalama termal akı değerleri

Kazıktaki ortalama termal akış- zaman grafiği Şekil 4.38. 'te incelendiğinde, termal akış değerinin giderek azaldığı ve bir noktadan sonra sabit bir değere ulaştığı sonucuna varılmaktadır.

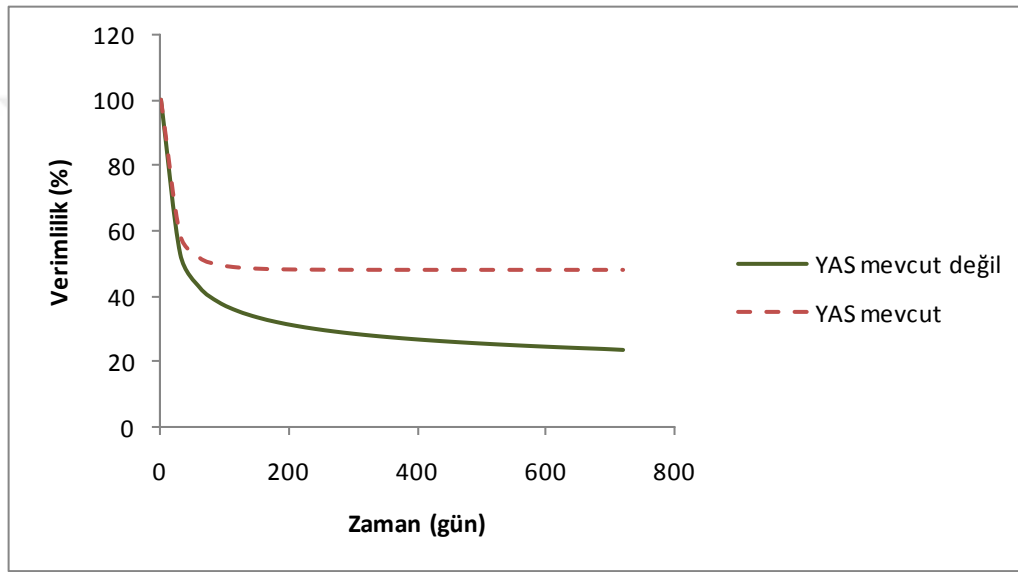
Tablo 4.8. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim yüzdeleri (plan analiz)

Zaman	Verimlilik (%)	
	YAS mevcut değil	YAS mevcut
0	100	100
30	52,88680	58,55118
60	42,72600	51,65808
90	38,15569	49,51569
120	35,43222	48,69485
150	33,53682	48,33284
180	32,10085	48,15805
210	30,95642	48,06874
240	30,01303	48,02144
270	29,21601	47,99579
300	28,52980	47,98162
330	27,93000	47,97370
360	27,39919	47,96923
390	26,92453	47,96668
420	26,49631	47,96522
450	26,10703	47,96437
480	25,75078	47,96388
510	25,42283	47,96359
540	25,11933	47,96343
570	24,83713	47,96333
600	24,57360	47,96327
630	24,32655	47,96323
660	24,32650	47,96321

Tablo 4.8 (devamı)

Zaman	Verimlilik (%)	
	YAS mevcut değil	YAS mevcut
690	23,87466	47,96320
720	23,58642	47,96319

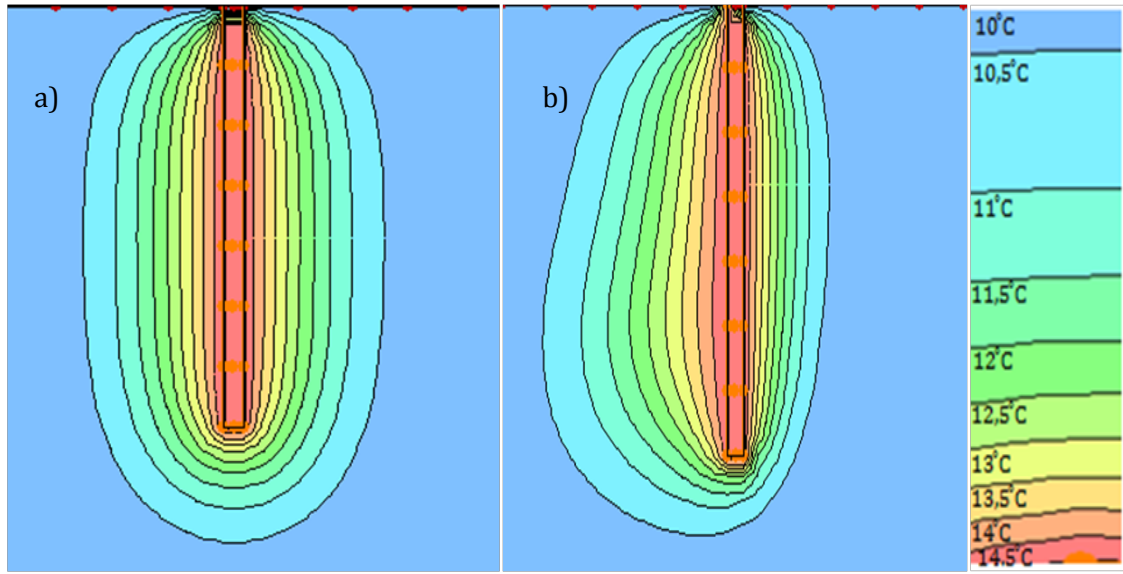
Tablo 4.8'den elde edilen yüzde verim değerleri incelendiğinde, değerlerin kış dönemi kullanımında (sığ zeminden ısı kazanımı) tekil kazığın plan analizi sonucu elde edilen değerlerle benzerlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.39). Genel itibariyle ortak parametreler ve sıcaklık farkları için analiz yapıldığından sonuçların benzerlik göstermesi beklenen bir durumdur.



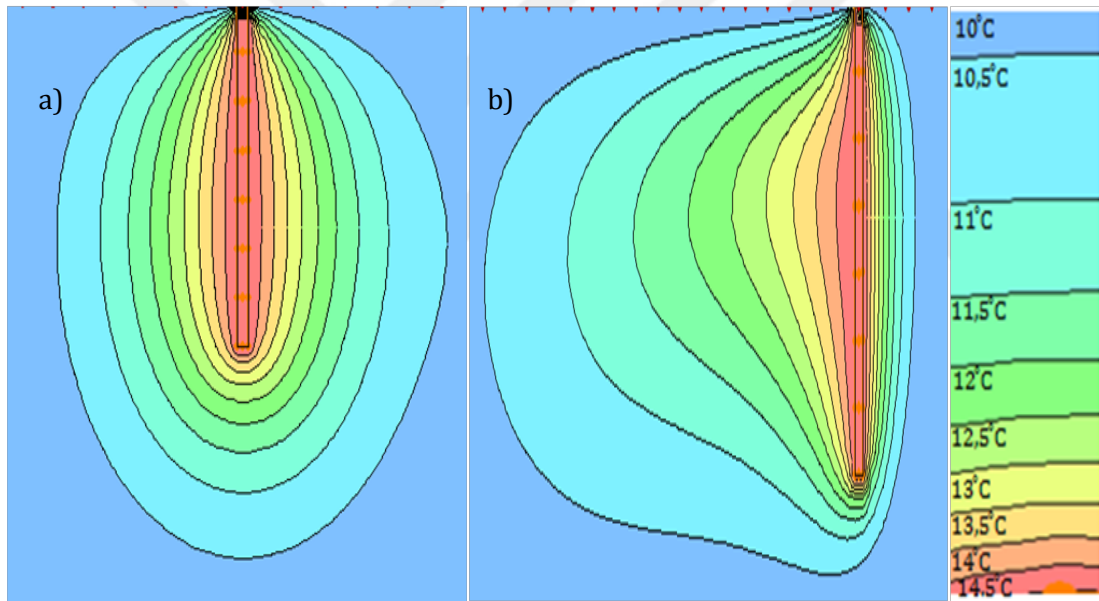
Şekil 4.39. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının plan analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri

4.1.6. Yaz Dönemi Kullanımında (Sığ zemine ısı enjeksiyonu) Tekil Enerji Kazığının Kesit Analizi

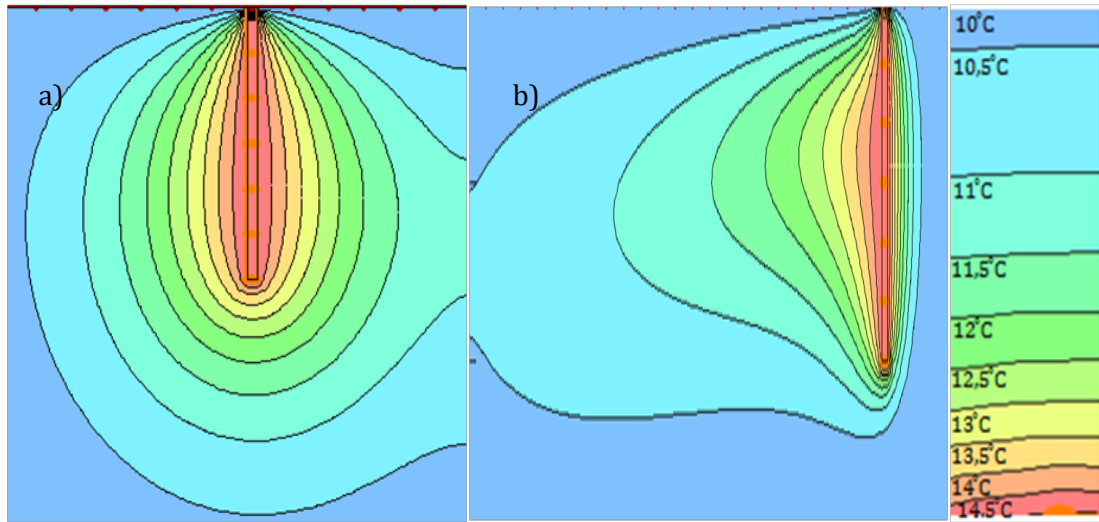
Tekil enerji kazığının yaz dönemi kullanımının modellenmesinde (Sığ zemine ısı enjeksiyonu) zemin hidrolik iletkenlik değeri 0,864 m/gün ve akiferdeki yeraltı suyu akış hızı 0,16 m/gün olarak programa işlenmiştir.



Şekil 4.40. a) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

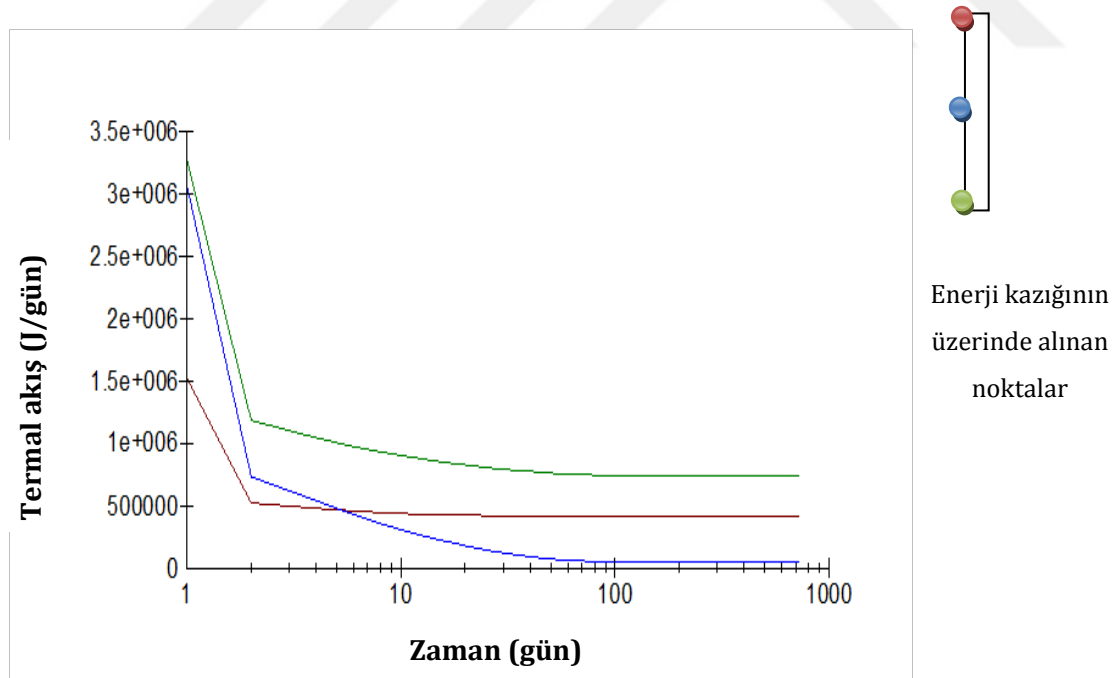


Şekil 4.41. a) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)



Şekil 4.42. a) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonundaki kesit sıcaklık profili (YAS mevcut, $v=0,16\text{m/gün}$)

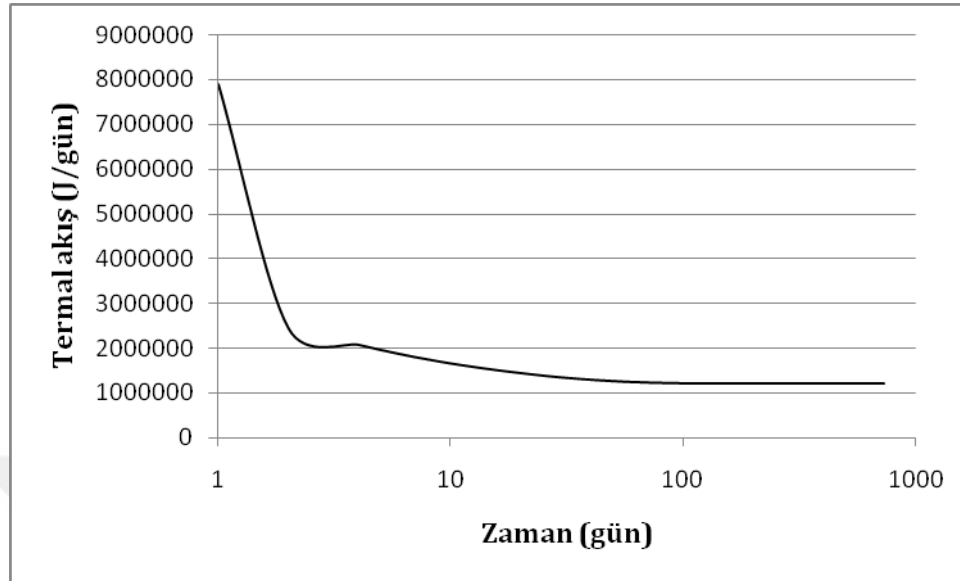
Tekil enerji kazığının analiz süresi ilerledikçe, yeraltı suyunun olmadığı durumlarda simetrik olarak ısıyı çevre zemine dağıttığını, yeraltı suyunun bulunduğu durumda ise akış yönüne bağlı olarak sol tarafa doğru ısıyı taşıdığı analiz görüntülerinde belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.40 , Şekil 4.41 ve Şekil 4.42).



Şekil 4.43. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının kesit analizinde kazık çevresindeki üç adet noktanın termal akı-zaman eğrisi

Analizlerde elde edilen en yüksek termal akı değerinin kazığın alt ucunda seçilen noktada olduğu görülmektedir. Kazığın üst noktası ise zemin yüzeyine tanımlanmış olan sınır

sıcaklık koşulundan etkilendiği için termal akı değeri alt noktada görülen değere kıyasla daha düşük gerçekleşmiştir (Şekil 4.43).



Şekil 4.44. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde tekil kazık için termal akı-zaman grafiği

Kazık boyunca ortalama termal akış değeri analiz süresi arttıkça azalmakta ve bir süreden sonra sabitlenerek termal dengeye ulaşmaktadır (Şekil 4.44).

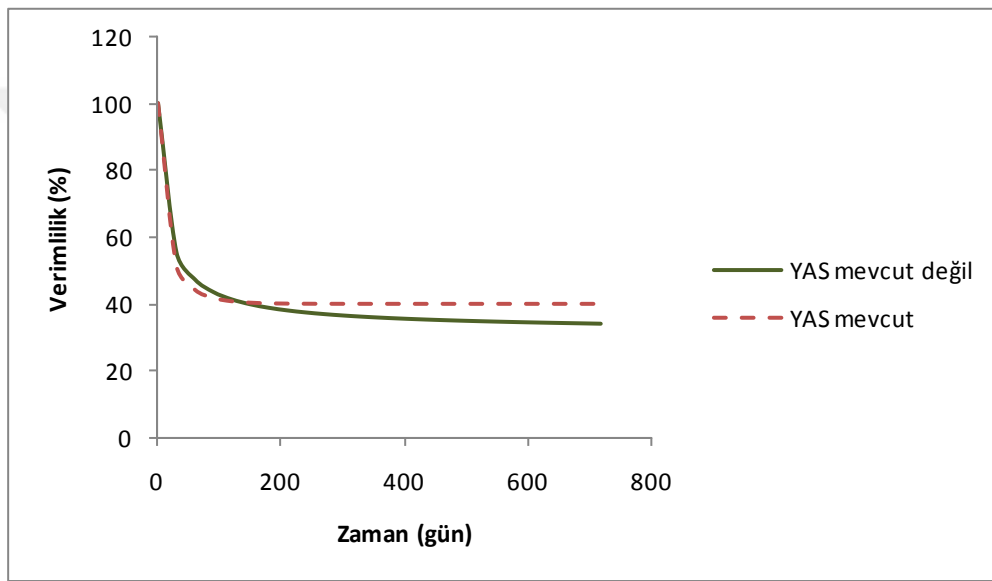
Tablo 4.9. Yaz dönemi kullanımı için yapılan kesit analizde tekil enerji kazığının zamana bağlı olarak enerji verim değerleri

Zaman	Verimlilik (%)	
	YAS mevcut değil	YAS mevcut
0	100	100
30	55,51981	51,27539
60	47,47347	44,17441
90	43,72045	41,72111
120	41,52390	40,73457
150	40,07111	40,31102
180	39,03412	40,12333
210	38,25389	40,03870
240	37,64361	40,00010
270	37,15168	39,98234
300	36,74554	39,97408
330	36,40358	39,97019
360	36,11092	39,96832
390	35,85696	39,96740
420	35,63399	39,96692
450	35,43622	39,96666
480	35,25926	39,96650
510	35,09969	39,96641
540	34,95481	39,96634
570	34,82250	39,96630

Tablo 4.9. (devamı)

Zaman	Verimlilik (%)	
	YAS mevcut değil	YAS mevcut
600	34,70099	39,96626
630	34,58888	39,96623
660	34,48498	39,96621
690	34,38832	39,96620
720	34,28521	39,96619

Analizler neticesinde elde edilen verimlilik değerleri (Tablo 4.9), zamana bağlı olarak Şekil 4.45'te sunulan grafikte yer almaktadır. Grafikten görüldüğü üzere yeraltı suyunun dikkate alındığı analizler neticesinde elde edilen verimlilik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



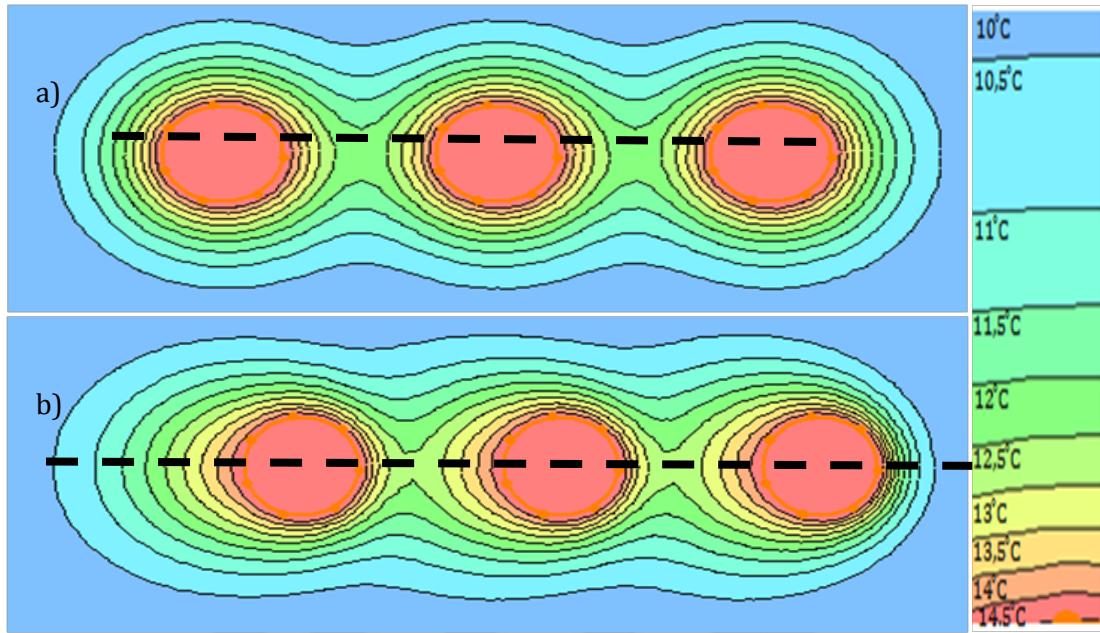
Şekil 4.45. Yaz dönemi kullanımında tekil enerji kazığının kesit analizi için yeraltı suyu durumuna bağlı enerji verimlilik yüzdeleri

4.1.7. Yaz Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılmının Modellenmesi (Akım yönüne paralel yerleşim)

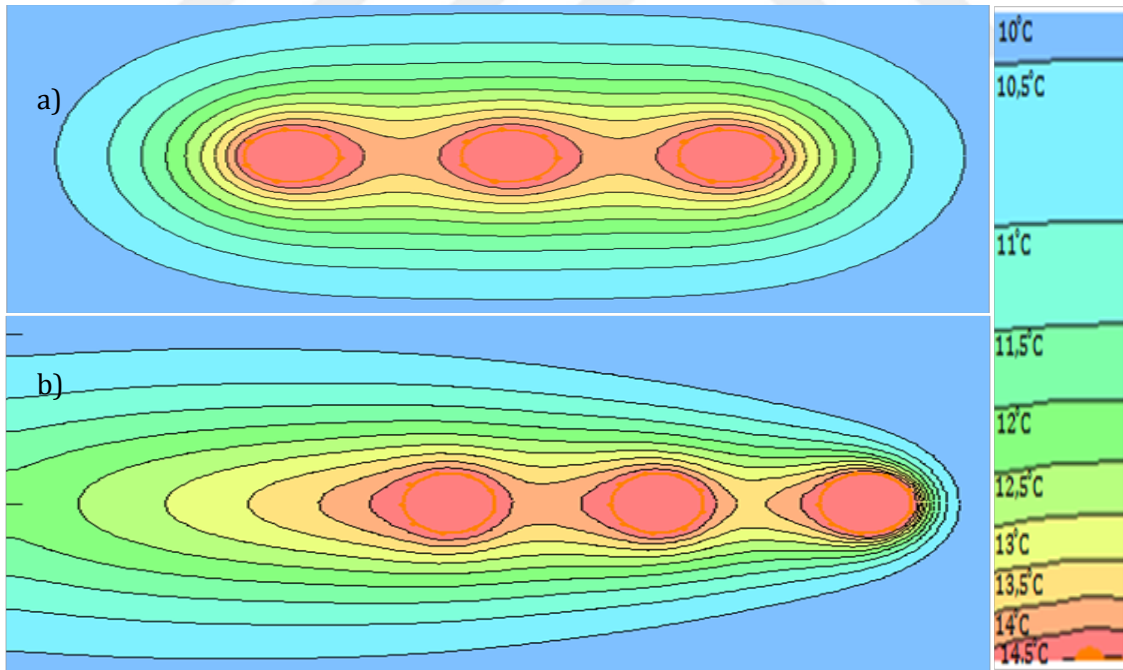
Sığ zemin ve enerji kazıkları için önceki analizlerde kullanılan ortak parametreler ile, yaz dönemi kullanımında işletilen (sığ zemine ısı enjeksiyonu) üç adet enerji kazığının akiferdeki yeraltı suyu akım yönüne paralel olarak konumlandırıldığı durum için plan analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda enerji kazıklarını çevreleyen zeminde yeraltı suyu hareketi söz konusu olduğunda zemin sıcaklıklarının akım yönünde artış gösterdiği ve termal verim değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Şekil 4.46 - Şekil 4.48'de görüldüğü üzere plan analizde kazık merkezlerinden geçen bir kesit çizgi boyunca zemin içinde seçilen noktaların sıcaklık değerleri alınmış ve yeraltı suyunun

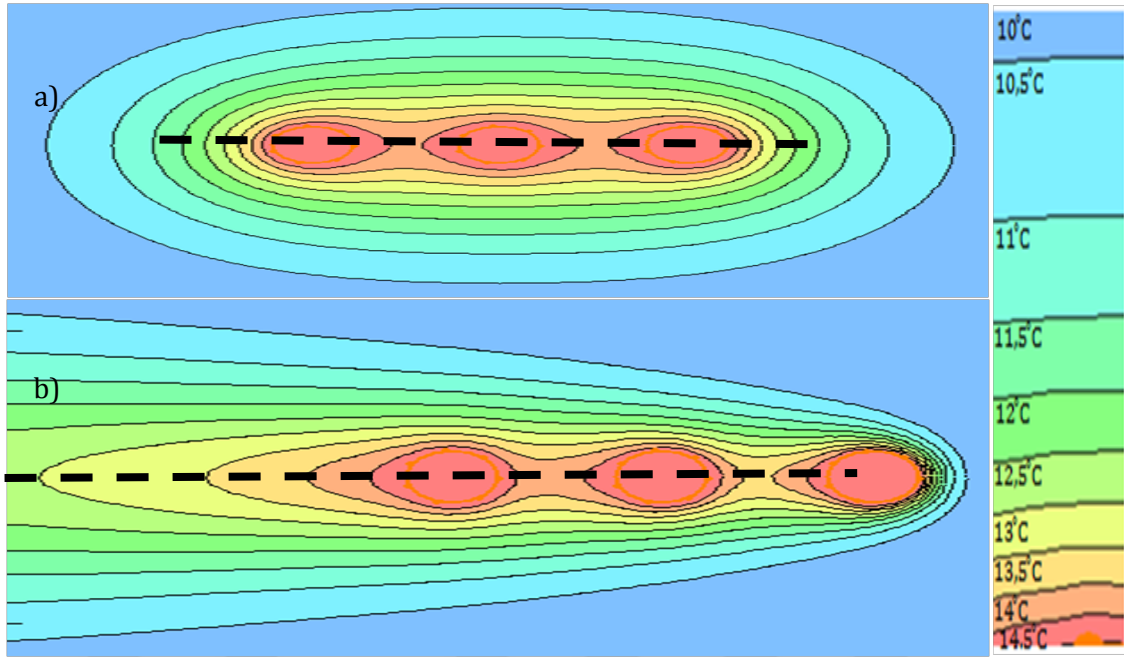
bulunmadığı durum için Şekil 4.49, yeraltı suyunun bulunduğu durum için ise Şekil 4.50'de sunulan grafikler elde edilmiştir.



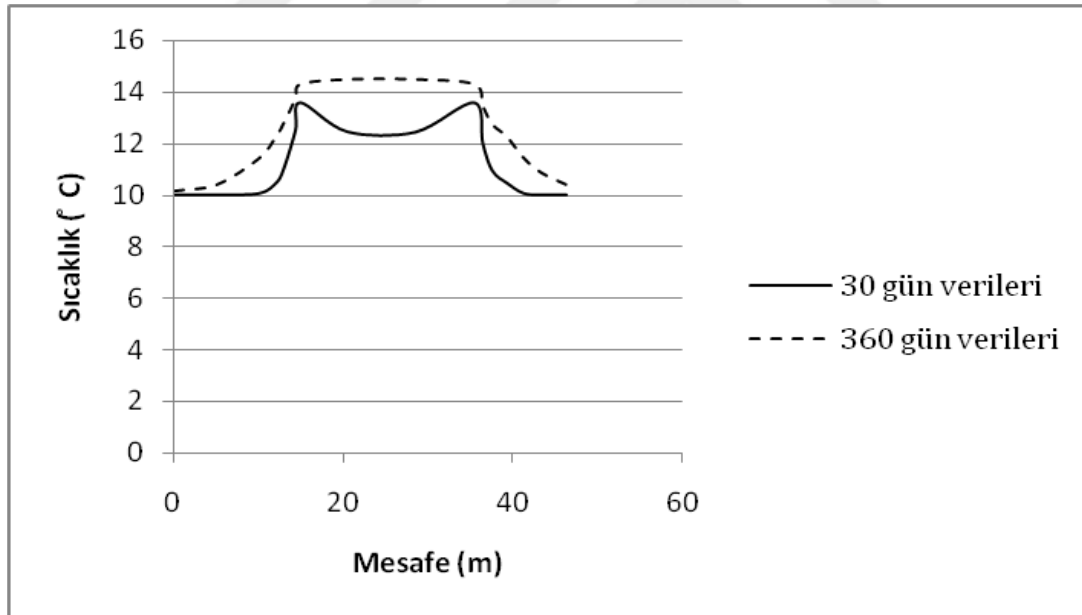
Şekil 4.46. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



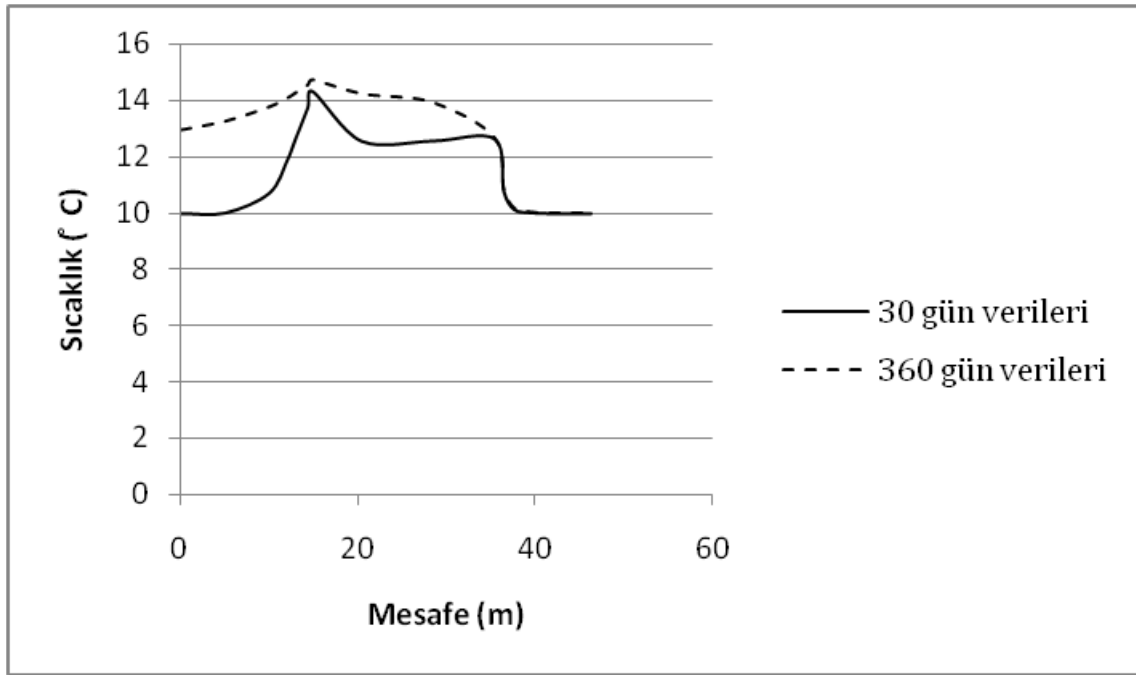
Şekil 4.47. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



Şekil 4.48. a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)

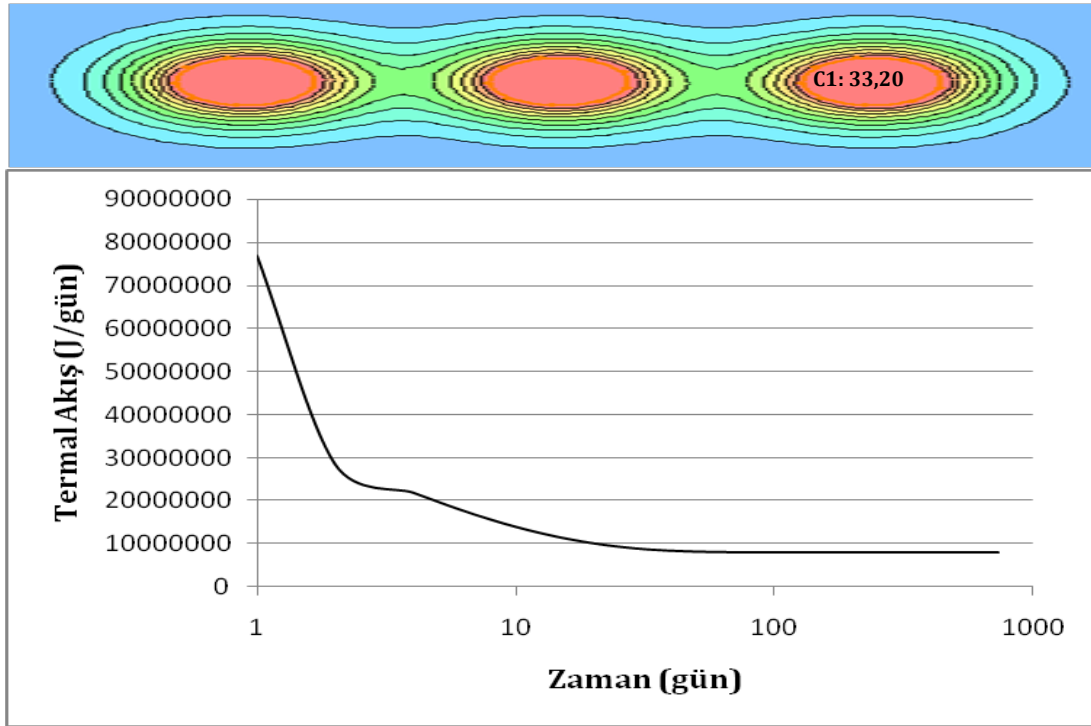


Şekil 4.49. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık- mesafe profilleri (YAS mevcut değil)

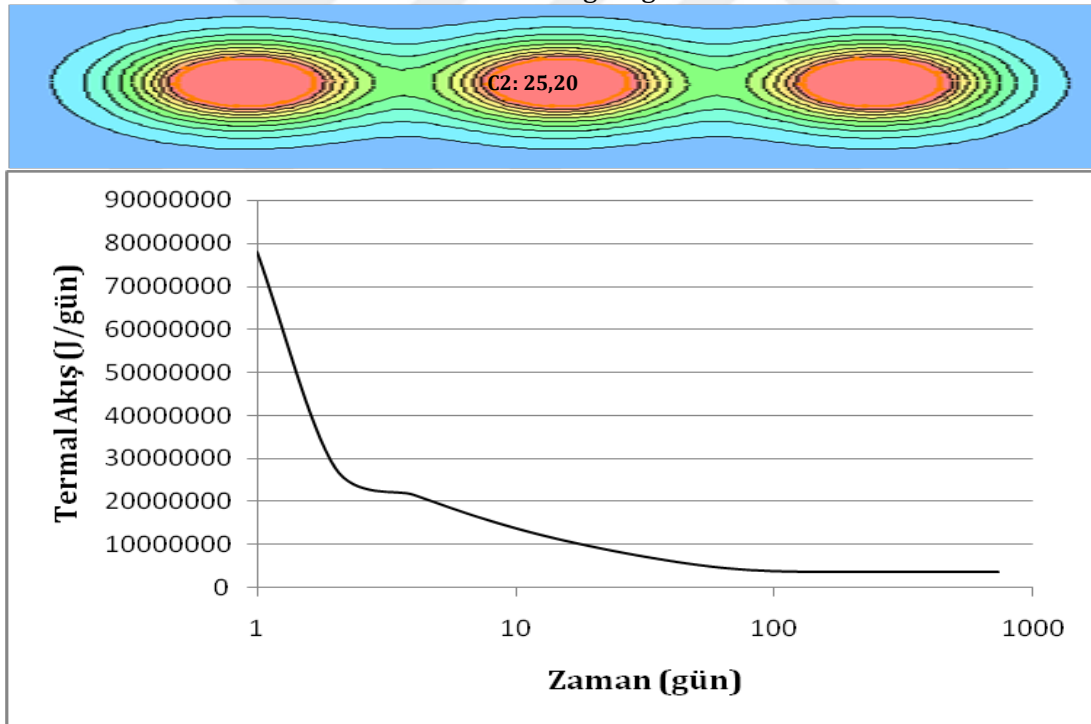


Şekil 4.50. Grup merkezi üzerinden alınan bir kesitte 30 gün ve 360 gün sonunda gözlenen sıcaklık- mesafe profilleri (YAS mevcut)

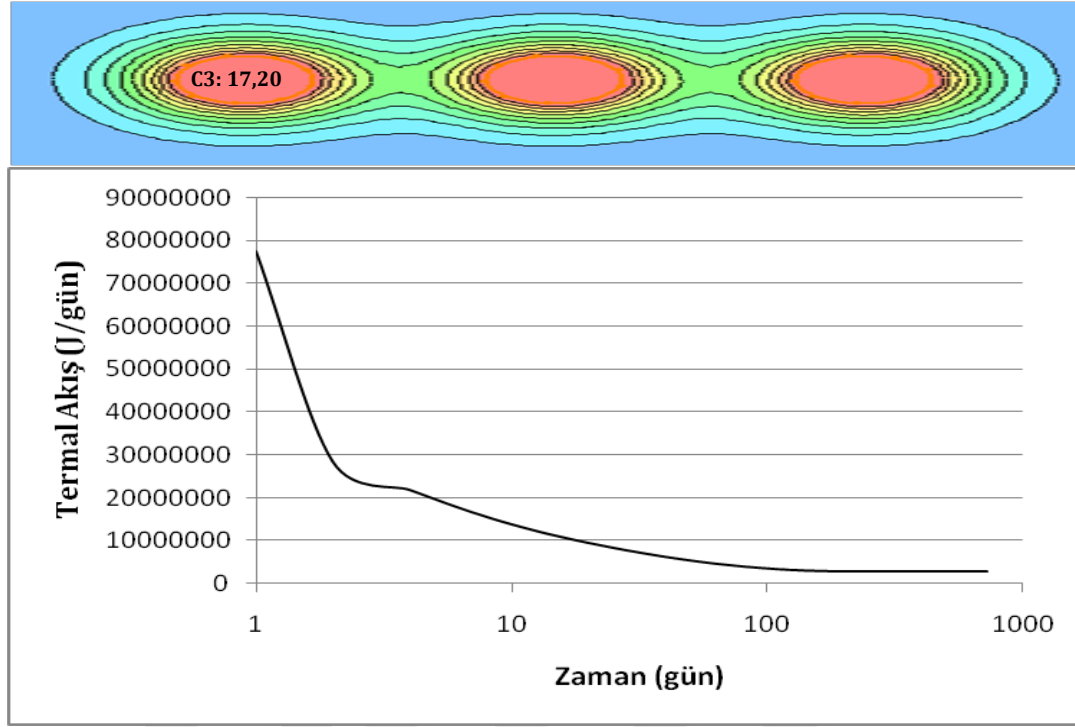
Grafikler incelendiğinde, yeraltı suyunun bulunduğu analizlerde zemin sıcaklık değerlerinin asimetric tarzda sol tarafa doğru artış gösterdiği, yeraltı suyu hareketi olmayan analizlere göre ise büyük oranda simetrik bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, grupta yer alan her üç kazığın da termal akış- zaman grafikleri incelendiğinde en yüksek termal akı değerinin C1 kazığında meydana geldiği görülmektedir. Her üç kazıkta da termal akı değeri yaklaşık olarak 100 gün sonunda sabit kalmaktadır (Şekil 4.51 , Şekil 4.52 ve Şekil 4.53).



Şekil 4.51. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C1 enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.52. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C2 enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.53. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde C3 enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği

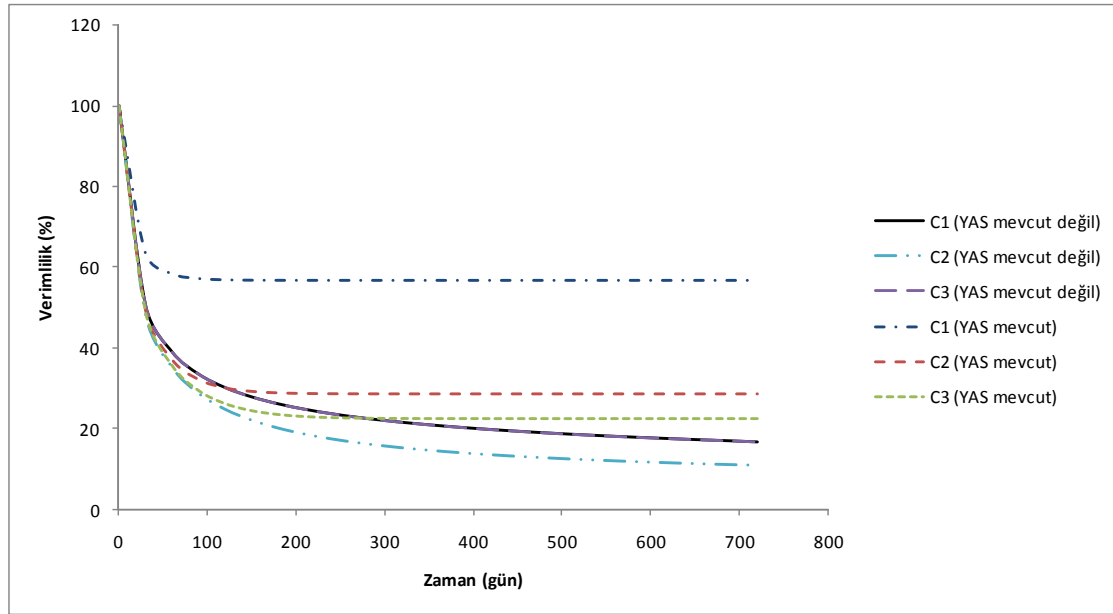
Tablo 4.10. Akım yönüne paralel tarzda konumlandırılan kazık grubunda verimlilik değerleri (plan analiz)

Zaman (gün)	Verimlilik (%)					
	YAS mevcut değil			YAS mevcut		
	1.kazık	2.kazık	3.kazık	1.kazık	2.kazık	3.kazık
0	100	100	100	100	100	100
30	50,52879	48,15846	50,54191	63,37668	49,30514	48,91493
60	38,94081	35,12031	38,95651	58,39655	37,0918	35,59905
90	33,43325	28,65852	33,44471	57,22096	32,20071	29,40999
120	30,09335	24,714	30,10232	56,90778	30,13565	26,1843
150	27,78587	22,02639	27,79346	56,81742	29,26509	24,44159
180	26,06676	20,06962	26,07351	56,78975	28,90318	23,49968
210	24,72154	18,57813	24,72772	56,78087	28,75501	22,99962
240	23,63119	17,40116	23,63695	56,77793	28,69518	22,74106
270	22,72342	16,44651	22,72887	56,77693	28,6713	22,61121
300	21,95155	15,6547	21,95675	56,77659	28,66186	22,54785
330	21,28394	14,98578	21,28894	56,77647	28,65816	22,51776
360	20,69838	14,41193	20,7032	56,77642	28,65672	22,50381
390	20,17873	13,91325	20,18341	56,77641	28,65617	22,49749
420	19,71297	13,47509	19,71752	56,7764	28,65595	22,49467
450	19,29194	13,08644	19,29637	56,7764	28,65587	22,49345
480	18,90849	12,73884	18,91283	56,7764	28,65584	22,49292
510	18,55699	12,4257	18,56123	56,7764	28,65583	22,49269
540	18,23289	12,14178	18,23705	56,7764	28,65582	22,4926
570	17,93251	11,88288	17,93659	56,7764	28,65582	22,49256
600	17,65281	11,64557	17,65682	56,7764	28,65582	22,49254
630	17,39126	11,42704	17,39521	56,7764	28,65582	22,49254
660	17,14575	11,22494	17,14964	56,7764	28,65582	22,49253

Tablo4.10.(devam)

Zaman (gün)	Verimlilik (%)					
	YAS mevcut değil			YAS mevcut		
	1.kazık	2.kazık	3.kazık	1.kazık	2.kazık	3.kazık
690	16,91449	11,03732	16,91832	56,7764	28,65582	22,49253
720	16,64372	10,89215	16,67541	56,7764	28,65582	22,49253

Şekil 4.54'te zamana bağlı olarak, Tablo 4.10' dan elde edilen kazıklardaki enerji verim değerleri karşılaştırılmaktadır. Şekil incelendiğinde en yüksek verim değerinin yeraltı suyunun bulunduğu analizde birinci kazık için (33,20), en düşük verim ise yeraltı suyunun bulunmadığı analizde ikinci kazıktadır (25,20).

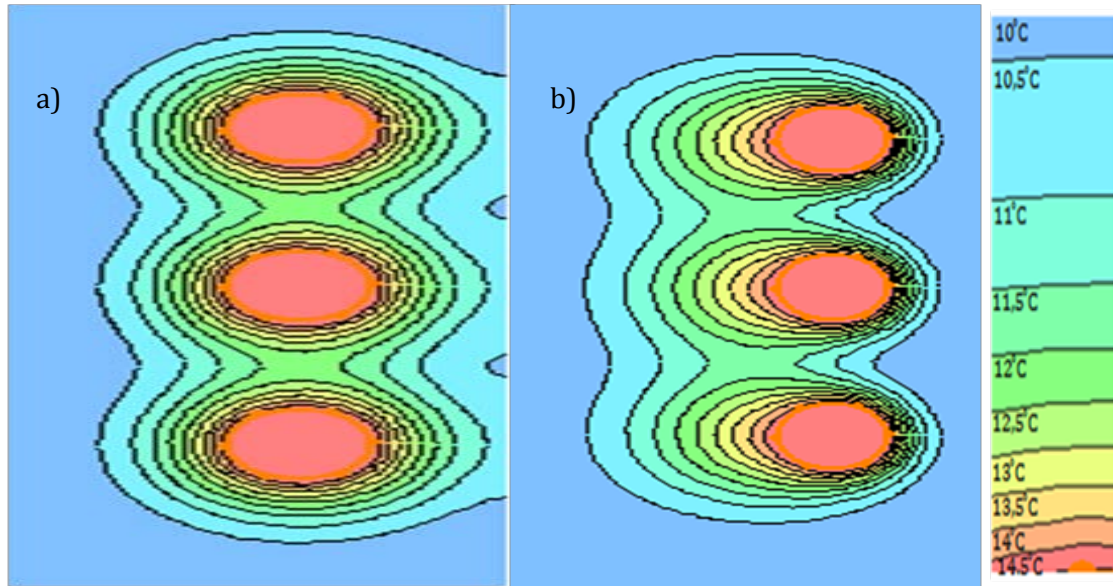


Şekil 4.54. Yaz dönemi kullanımında (sığ zemine ısı enjeksiyonu) akım yönüne paralel konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu karşılaştırılması(plan analiz)

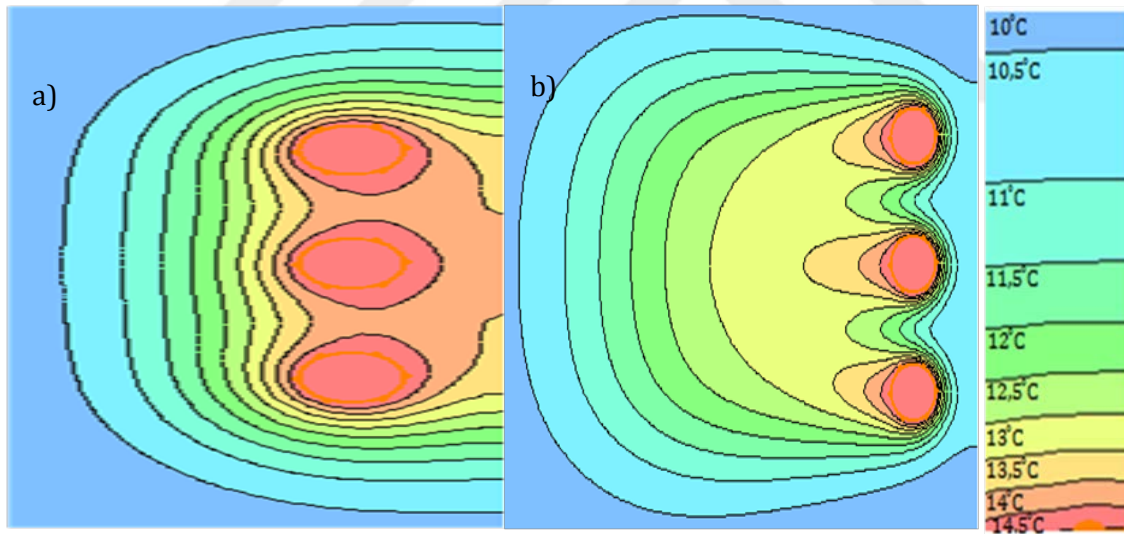
4.1.8.Yaz Dönemi Kullanımında Grup Enerji Kazıklarında Isı Yayılmının Modellenmesi (Akım yönüne dik yerleşim)

Sığ zemin ve enerji kazıkları için önceki analizlerde kullanılan ortak parametreler ile, yaz dönemi kullanımında işletilen (sığ zemine ısı enjeksiyonu) üç adet enerji kazığının akiferdeki yeraltı suyu akım yönüne dik olarak konumlandırıldığı durum için plan analizler yapılmıştır. Şekil 4.55, Şekil 4.56, ve Şekil 4.57'de sunulan zemin sıcaklık profilleri incelendiğinde kış dönemi kullanımı (sığ zeminden ısı kazanımı) sürecinde oluşan sıcaklık profillerine benzer tarzda olduğu ancak zemin içerisinde sıcaklıkların ısı enjeksiyonu nedeniyle arttığı gözlenmiştir. Yeraltı suyu akımının mevcut olduğu analizlerden elde edilen zemin sıcaklık profilleri incelendiğinde sıcaklık değişimlerinin akım yönünde ötelendiği görülmektedir. Grupta yer alan bütün enerji kazıklarının da termal akı- zaman grafikleri Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil

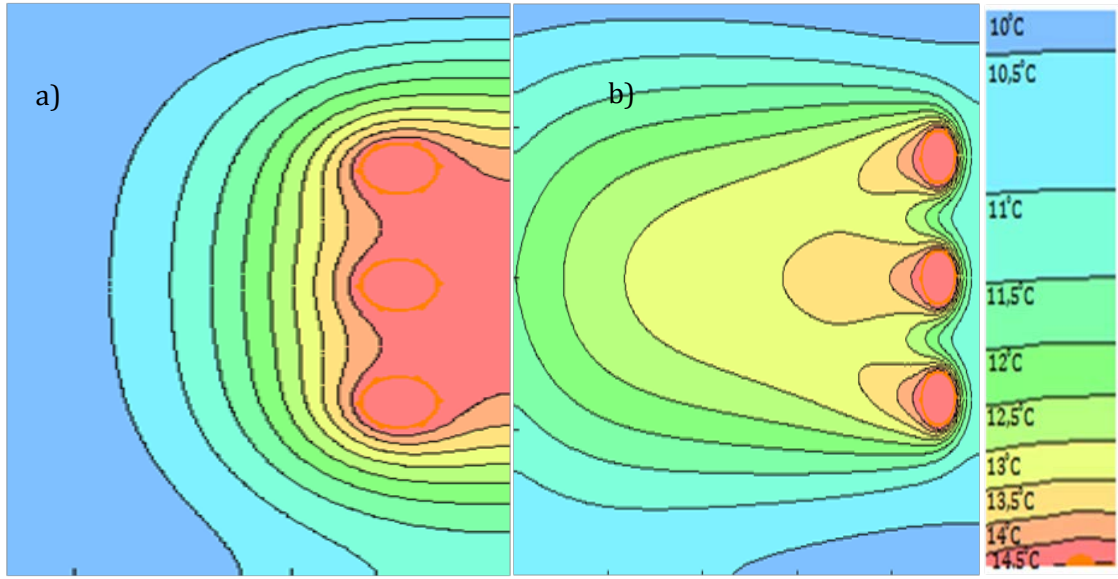
4.60'da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde kazıkların termal akı değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Kazık grubunun yeraltı suyu akım yönüne dik yerleştirilmesi nedeniyle kazıklar arası belirgin bir termal etkileşim olmamaktadır.



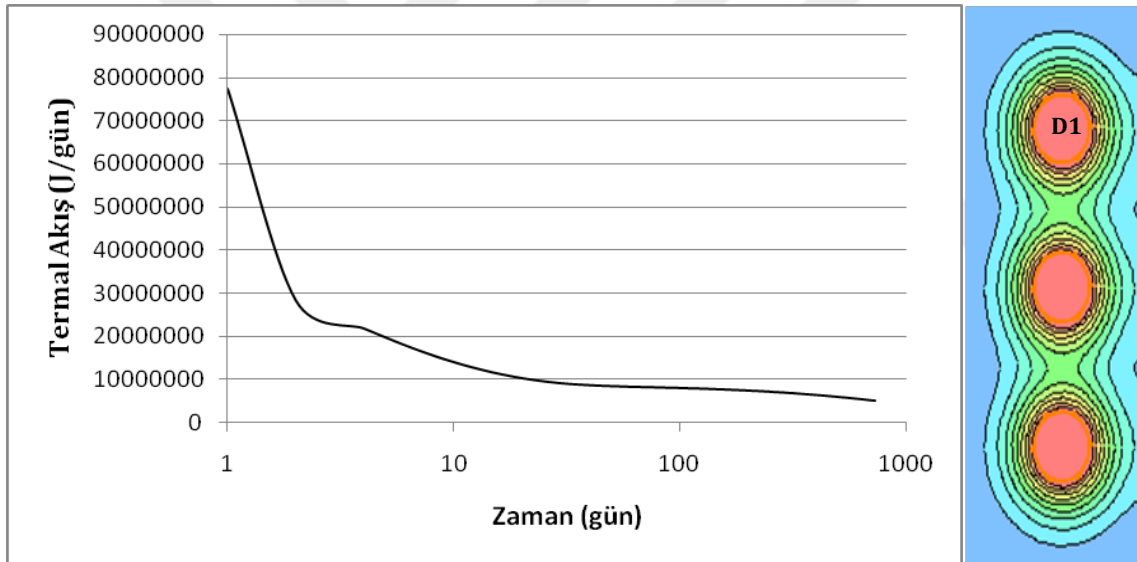
Şekil 4.55. a) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 30 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



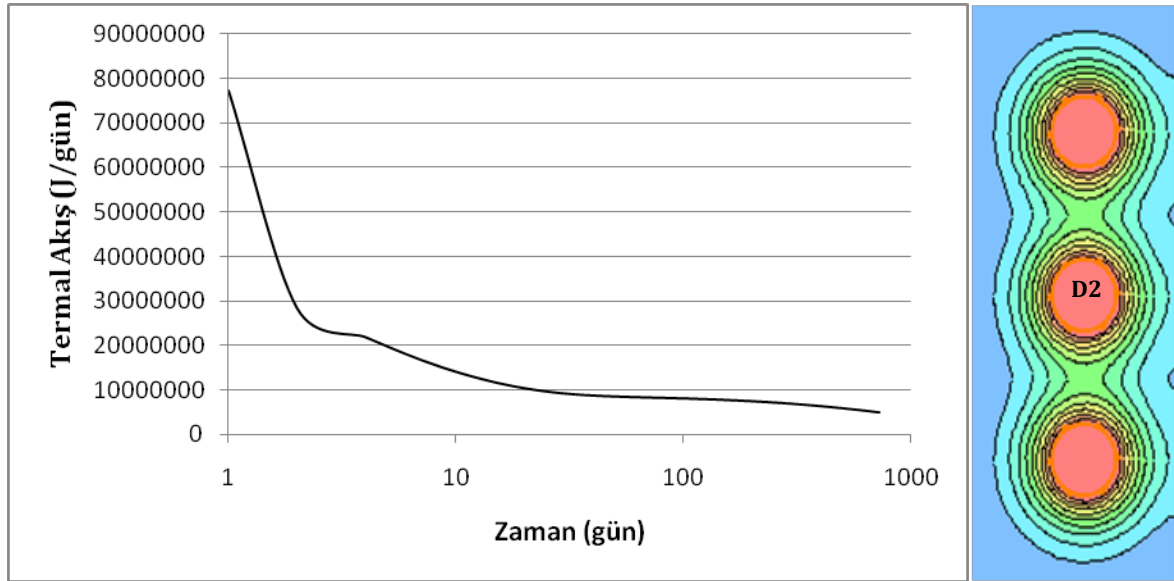
Şekil 4.56. a) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 180 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



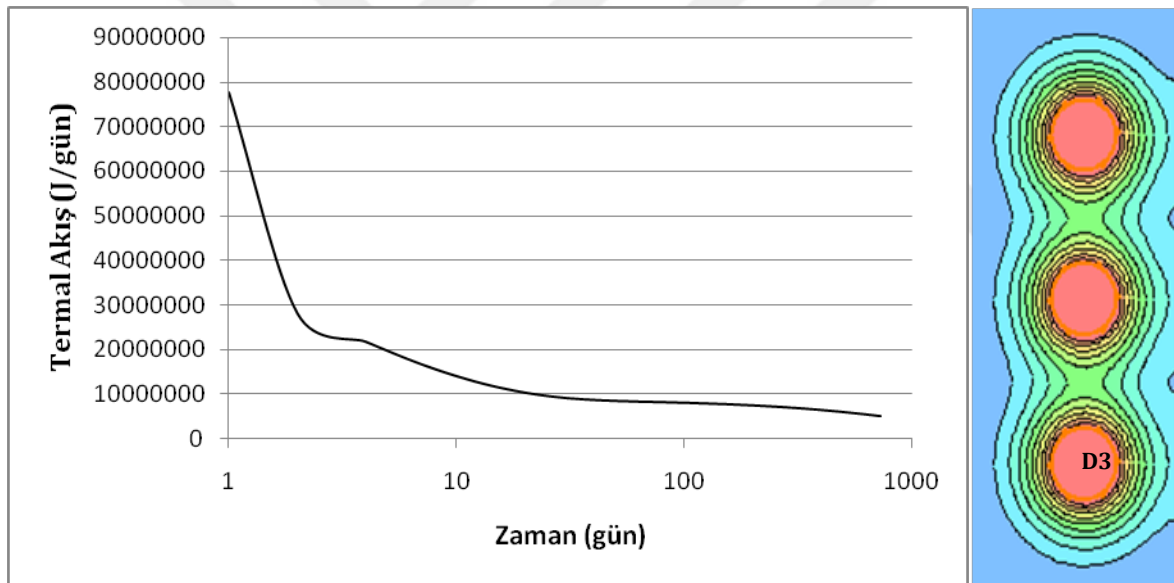
Şekil 4.57.a) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut değil) b) 360 gün sonunda zeminde oluşan sıcaklık dağılımları (YAS mevcut)



Şekil 4.58. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde (D1) enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği



Şekil 4.59. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde (D2) enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği

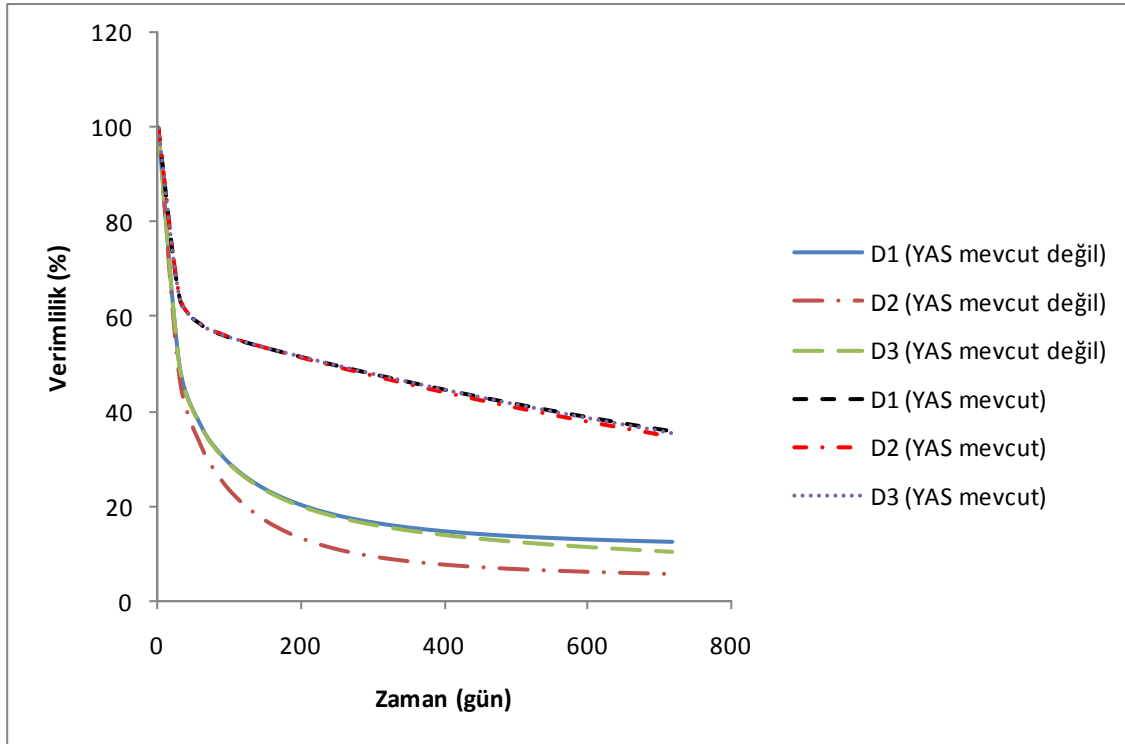


Şekil 4.60. Yaz dönemi kullanımı (zemine ısı enjeksiyonu) sürecinde (D3) enerji kazığı için termal akı- zaman grafiği

Tablo 4.11. Akım yönüne dik tarzda konumlandırılan kazık grubunda verimlilik değerleri (plan analiz)

Zaman (gün)	Verimlilik (%)					
	YAS mevcut değil			YAS mevcut		
	1.kazık (D1)	2.kazık (D2)	3.kazık (D3)	1.kazık (D1)	2.kazık (D2)	3.kazık (D3)
0	100	100	100	100	100	100
30	49,57043	47,00765	49,57362	64,00024	64,2005	64,00357
60	37,01775	32,81101	37,02649	58,38163	58,56945	58,39525
90	30,61162	25,28288	30,61343	56,19339	56,33408	56,20953
120	26,51922	20,44532	26,50961	54,74794	54,82832	54,76614
150	23,62090	17,06679	23,59371	53,49926	53,51261	53,51872
180	21,46038	14,60972	21,40738	52,32273	52,26578	52,34222
210	19,80076	12,77946	19,71215	51,18740	51,05908	51,20534
240	18,49908	11,39205	18,36402	50,08455	49,88520	50,09908
270	17,46130	10,32445	17,26856	49,01109	48,74191	49,02008
300	16,62240	9,491187	16,36086	47,96548	47,62818	47,96655
330	15,93594	8,831610	15,59502	46,94667	46,54322	46,93728
360	15,36797	8,302041	14,93798	45,95381	45,48627	45,93127
390	14,89326	7,870709	14,36556	44,98615	44,45661	44,94768
420	14,49275	7,514309	13,85992	44,04302	43,45346	43,98577
450	14,15188	7,215627	13,40771	43,12375	42,47607	43,04489
480	13,85940	6,961855	12,99888	42,22774	41,52372	42,12444
510	13,60652	6,743403	12,62579	41,35440	40,59566	41,22389
540	13,38633	6,553038	12,28256	40,50316	39,69120	40,34272
570	13,19330	6,385263	11,96463	39,67344	38,80963	39,48049
600	13,02304	6,235871	11,66845	38,86472	37,95031	38,63675
630	12,87197	6,101611	11,39116	38,07645	37,11257	37,81109
660	12,73719	5,979954	11,13050	37,30812	36,29581	37,00314
690	12,61632	5,868911	10,88462	36,55920	35,49941	36,21250
720	12,49874	5,757413	10,62587	35,84690	34,58915	35,37140

Akiferdeki akım yönüne dik olarak konumlandırılan kazıklar için verimlilik değerleri Tablo 4.11’de verilmiştir. Tabloda verilen değerler doğrultusunda zamana bağlı olarak enerji kazıklarının zamana bağlı verim değerleri Şekil 4.61’de görselleştirilmiştir. Grafik incelendiğinde en düşük verimlilik değerinin yeraltı suyunun olmadığı analizde ikinci kazıkta (D2) olduğu görülmektedir. Verim değerindeki düşüşün çevreleyen kazıklar ile meydana gelen termal etkileşimden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.61. Yaz dönemi kullanımında (sığ zemine ısı enjeksiyonu) akım yönüne dik konumlandırılan kazık gruplarının verim değerlerinin toplu karşılaştırılması(plan analiz)

4.2. Akiferdeki Akış Hızının Enerji Kazıklarının Performansına Etkisinin Parametrik Olarak İncelemesi

Sığ zemin içerisinde bulunabilecek yeraltı suyunun akış hızının, tekil ve grup enerji kazıklarının verimliliğine etkisini incelemek amacıyla farklı yeraltı suyu akış hızları dikkate alınarak sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizler hem yaz hem de kış dönemi kullanımına yönelik olarak yapılmıştır ancak verimlilik değerleri açısından içerdikleri benzerlik nedeniyle bu tez çalışmasında sadece yaz dönemi kullanımına yönelik olarak yapılan analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Tablo 4.12-Tablo 4.15'ten elde edilen verilere göre tekil kazığın plan analizinde, yeraltı suyunun akış hızı arttıkça elde edilebileceği öngörülen enerji değerlerinin arttığı görülmüştür.

Tablo 4.12. Farklı yeraltı suyu akış hızları için tekil enerji kazığı ile sağlanabilecek enerji değerleri (plan analiz)

zaman(gün)	Enerji Değerleri (Watt)		
	v = 0,16 metre/gün	v = 0,8 metre/gün	v = 1,6 metre/gün
0	161,454	222,740	287,445
30	94,5331	175,661	246,890
60	83,4039	171,340	243,150
90	79,9449	170,534	242,393
120	78,6196	170,368	242,231
150	78,0352	170,332	242,196
180	77,7530	170,325	242,188
210	77,6088	170,323	242,187
240	77,5324	170,323	242,186
270	77,4910	170,323	242,186
300	77,4681	170,323	242,186
330	77,4553	170,323	242,186
360	77,4481	170,323	242,186
390	77,4440	170,323	242,186
420	77,4416	170,323	242,186
450	77,4403	170,323	242,186
480	77,4395	170,323	242,186
510	77,4390	170,323	242,186
540	77,4387	170,323	242,186
570	77,4386	170,323	242,186
600	77,4385	170,323	242,186
630	77,4384	170,323	242,186
660	77,4384	170,323	242,186
690	77,4384	170,323	242,186
720	77,4384	170,323	242,186

Tablo 4.13. Farklı yeraltı suyu akış hızları için tekil enerji kazığı ile sağlanabilecek enerji değerleri (kesit analiz)

zaman(gün)	Enerji Değerleri (watt)		
	v = 0,16 metre/gün	v = 0,8 metre/gün	v = 1,6 metre/gün
0	89,9025	79,3897	72,119
30	46,0979	45,5129	43,364
60	39,7139	43,5678	42,471
90	37,5083	43,3035	42,398
120	36,6214	43,2653	42,392
150	36,2406	43,2597	42,392
180	36,0719	43,2589	42,392
210	35,9958	43,2588	42,392
240	35,9611	43,2588	42,392
270	35,9451	43,2588	42,392
300	35,9377	43,2588	42,392
330	35,9342	43,2588	42,392
360	35,9325	43,2588	42,392
390	35,9317	43,2588	42,392
420	35,9313	43,2588	42,392
450	35,931	43,2588	42,392
480	35,9309	43,2588	42,392
510	35,9308	43,2588	42,392
540	35,9307	43,2588	42,392

Tablo4.13.(devam)

570	35,9307	43,2588	42,392
600	35,9307	43,2588	42,392
630	35,9306	43,2588	42,392
660	35,9306	43,2588	42,392
690	35,9306	43,2588	42,392
720	35,9306	43,2588	42,392

Tablo 4.14. Farklı akış hızlarında akım yönüne paralel konumlandırılmış kazık grupları için elde edilen enerji değerleri (plan analiz)

zaman(gün)	Enerji Değerleri (Watt)								
	1.kazık (33,20)	2.kazık (25,20)			3.kazık (17,20)				
	v= 0,16metre/gün	v = 0,8 metre/gün	v = 1,6 metre/gün	v = 0,16 metre/gün	v = 0,8 metre/gün	v = 1,6 metre/gün	v = 0,16 metre/gün	v = 0,8 metre/gün	v = 1,6 metre/gün
0	169,39	261,357	346,80	153,63	181,52	211,43	154,29	175,37	197,43
30	107,35	219,121	309,60	75,751	109,87	145,98	75,474	95,059	122,29
60	98,922	215,277	306,01	56,987	100,02	139,28	54,928	81,434	113,31
90	96,931	214,518	305,26	49,472	98,364	138,28	45,378	78,677	111,96
120	96,400	214,356	305,10	46,299	98,092	138,10	40,401	78,160	111,74
150	96,247	214,321	305,07	44,962	98,045	138,06	37,712	78,068	111,74
180	96,200	214,314	305,06	44,406	98,036	138,06	36,259	78,052	111,69
210	96,185	214,312	305,06	44,178	98,034	138,05	35,487	78,049	111,69
240	96,180	214,311	305,06	44,086	98,034	138,05	35,088	78,049	111,69
270	96,179	214,311	305,06	44,050	98,034	138,05	34,888	78,049	111,69
300	96,178	214,311	305,06	44,035	98,034	138,05	34,790	78,049	111,69
330	96,178	214,311	305,06	44,030	98,034	138,05	34,744	78,049	111,69
360	96,178	214,311	305,06	44,027	98,034	138,05	34,722	78,049	111,69
390	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,712	78,049	111,69
420	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,708	78,049	111,69
450	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,706	78,049	111,69
480	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
510	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
540	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
570	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
600	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
630	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
660	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
690	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69
720	96,178	214,311	305,06	44,026	98,034	138,05	34,705	78,049	111,69

Tablo 4.15. Farklı akış hızlarında akım yönüne dik konumlandırılmış kazık grupları için elde edilen enerji değerleri (plan analiz)

zaman(gün)	Enerji Değerleri (watt)								
	1.kazık (45,28)			2.kazık (45,20)			3.kazık (45,12)		
	v = 0,16 metre/ gün	v = 0,8 metre/g ün	v = 1,6 metre/g ün	v = 0,16 metre/g ün	v = 0,8 metre/g ün	v = 1,6 metre/g ün	v = 0,16 metre/g ün	v = 0,8 metre/g ün	v = 1,6 metre/g ün
0	171,877	275,300	356,192	172,426	278,29	343,63	171,57	271,605	340,59
30	110,002	234,110	309,360	110,698	237,525	278,53	109,81	230,554	289,99
60	100,344	230,134	295,373	100,989	233,618	248,46	100,19	226,667	273,30
90	96,5834	229,158	282,967	97,1343	232,685	223,80	96,442	225,763	258,91
120	94,0990	228,785	269,840	94,5380	232,346	202,09	93,966	225,450	244,34
150	91,9528	228,545	255,867	92,2694	232,134	182,64	91,826	225,261	229,40
180	89,9306	228,338	241,348	90,1195	231,949	165,12	89,807	225,099	214,31
210	87,9793	228,140	226,612	88,0389	231,771	149,31	87,856	224,940	199,37
240	86,0837	227,947	211,935	86,0148	231,594	135,05	85,958	224,781	184,79
270	84,2387	227,757	197,532	84,0435	231,417	122,17	84,107	224,621	170,76
300	82,4415	227,570	183,562	82,1231	231,241	110,53	82,299	224,459	157,37
330	80,6904	227,384	170,138	80,2524	231,064	100,02	80,533	224,296	144,71
360	78,9839	227,200	157,337	78,4299	230,888	90,521	78,807	224,133	132,81
390	77,3208	227,018	145,208	76,6545	230,711	81,931	77,120	223,968	121,69
420	75,6997	226,837	133,776	74,9248	230,535	74,165	75,469	223,803	111,34
450	74,1197	226,657	123,050	73,2396	230,359	67,140	73,855	223,637	101,75
480	72,5797	226,478	113,025	71,5975	230,183	60,787	72,276	223,471	92,883
510	71,0786	226,300	103,687	69,9973	230,007	55,038	70,730	223,304	84,707
540	69,6155	226,123	95,0132	68,4377	229,832	49,837	69,219	223,137	77,189
570	68,1894	225,946	86,9770	66,9177	229,656	45,131	67,739	222,969	70,288
600	66,7994	225,770	79,5481	65,4360	229,481	40,871	66,292	222,801	63,964
630	65,4446	225,595	72,6940	63,9915	229,305	37,015	64,875	222,634	58,177
660	64,1240	225,420	66,3812	62,5832	229,130	33,524	63,489	222,465	52,889
690	62,8368	225,246	60,5759	61,2100	228,955	30,364	62,132	222,297	48,061
720	61,5927	225,118	55,4851	60,1850	228,158	27,584	61,324	222,103	46,268

Akiferdeki akım yönüne paralel tarzda konumlandırılan enerji kazık gruplarında yeraltı suyunun hızının artmasıyla öngörülen enerji değerleri grupta yer alan bütün kazıklar için artış sergilemektedir. Akım yönündeki ilk kazık ile en yüksek oranda ısı kazanımı gerçekleştiği görülmekte, gruptaki son kazıkta ise en düşük ısı kazanımı sağlanabilmektedir. Akiferdeki akım yönüne dik tarzda konumlandırılan enerji kazık gruplarında yeraltı suyu akış hızının 0,8 metre/gün olduğu analizde en yüksek oranda ısı kazanımı olduğu görülmüştür.

Akım yönüne paralel olarak konumlandırılan üç adet enerji kazığı ile oluşturulan grupta plan analiz sonuçları dikkate alınarak yeraltı suyunun elde edilebilecek ısı enerjisi üzerindeki etkisi doğrusal olmayan regresyon tekniği kullanılarak formülize edilmiştir. Zaman (t, gün) ve akiferdeki yeraltı suyu akım hızına (v, m/gün) bağlı olarak elde edilebilecek enerji miktarı (E, Watt) akım yönündeki birinci enerji kazığından başlayarak sırasıyla:

$$E \text{ (Watt)} = -0,3753\sqrt{t} + 249,4\sqrt{v} \quad (R^2=0.98) \quad (4.10)$$

$$E = -31,39\sqrt[5]{t} + 190\sqrt[4]{v} + 0,06008t \quad (R^2=0.98) \quad (4.11)$$

$$E = -39,45\sqrt[5]{t} + 145,2\sqrt[4]{v} + 0,07376t + 42,72 \quad (R^2=0.98) \quad (4.12)$$

Eşitlikleri ile elde edilebilmektedir. Akım yönüne dik tarzda konumlandırılan üç adet enerji kazığı ile oluşturulan grubun plan analizi doğrultusunda çevresel kazıklarda yaklaşık olarak özdeş miktarlarda enerji kazanımı gerçekleşebilmekteyken, orta kazıkta ısı etkileşiminden dolayı bir miktar fark meydana gelmektedir. Çevresel kazıklarda sağlanabilecek enerji miktarı:

$$E \text{ (Watt)} = -1,933\sqrt{t} + 294,0\sqrt{v} \quad (R^2=0.98) \quad (4.13)$$

Merkez kazıkta elde edilebileceği öngörülen ısı enerjisi ise

$$E \text{ (Watt)} = -2,054\sqrt{t} + 300,0\sqrt{v} \quad (R^2=0.98) \quad (4.14)$$

4.3. Örnek Çalışma: Mersin Kentsel Yerleşim Alanı için Enerji Kazıklarının Isıl Verimliliğinin Araştırılması

Enerji kazıklarının Mersin ili kentsel yerleşim alanı için verimlilik değerlerini incelemek amacıyla, örnek teşkil edebileceği düşünülen dört farklı lokasyonda deneysel olarak elde edilmiş olan zemin özellikleri baz alınarak TEMP/W ve SEEP/W [81-82] yazılımları ile sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır. Seçilen noktalar Akdeniz, Mezitli, Toroslar ve Yenişehir ilçeleri sınırları içinde yer almaktadır. Seçilen noktaları koordinat değerleri Tablo 5.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.16. Seçilen noktaların koordinatları

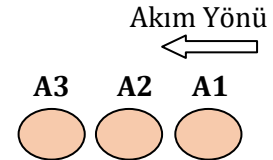
Nokta	Enlem	Boylam
1-Akdeniz	36°48'17.69"K	34°37'4.39"D
2-Mezitli	36°43'31.01"K	34°29'55.83"D
3-Toroslar	36°48'46.63"K	34°36'54.43"D
4-Yenişehir	36°47'50.75"K	34°36'2.20"D

Yapılan modelleme çalışmaları, akiferdeki yeraltı suyu akım yönüne paralel şekilde konumlandırıldığı kabul edilen kazık grupları için plan analiz yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. SEEP/W [82] yazılımı ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan parametreler, Mersin-Tarsus bölgesinin yamaç ve kıyı akiferlerindeki yeraltı suyu akım sisteminin karakterizasyonu ile ilgili olarak Hatipoğlu ve diğerleri tarafından 2009 yılında yapılan detaylı bir çalışma baz alınarak elde edilmiştir. Analizler için kentsel yerleşim bölgesinde seçilen noktalarda yeraltı suyu hidrolik yük değerleri Şekil 5.1'de yer alan Mersin-Tarsus bölgesi için Hatipoğlu ve diğerleri [83] tarafından oluşturulmuş hidrolik yük haritası kullanılarak tayin edilmiştir. Analiz noktalarının koordinatları belirlenerek hidrolik yük konturları arasında enterpolasyon yoluyla noktalar için hidrolik yük değerleri elde edilmiş, bu

Yapılan analizler sonucunda elde edilen ısı verimlilik değerleri Tablo 5.3'te yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde akım yönündeki ilk kazık için 360 günlük çalışma süreci sonunda yaklaşık %20 oranında ısı verimlilik elde edilebileceği görülmektedir.

Tablo 4.18. Akdeniz ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri

Zaman (gün)	Verimlilik (%)		
	A1	A2	A3
0	100	100	100
30	39,24	17,73	15,75
60	31,09	13,92	12,46
90	27,78	12,43	11, 15
120	25,62	11,46	10,29
150	24,35	10,89	9,790
180	23,18	10,37	9,320
210	22,17	9,92	8,92
240	21,47	9,61	8,64
270	20,83	9,32	8,38
300	20,25	9,06	8,15
330	19,89	8,89	8,00
360	19,54	8,74	7,86



4.3.2. Mezitli ilçesi

Mezitli ilçesi için analiz programına girilen değerler ve bu değerler sonucu elde edilen ısı verimlilik yüzdeleri Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te verilmektedir.

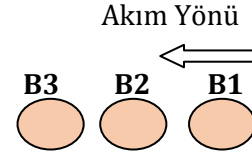
Tablo 4.19. Mezitli ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri

Parametre	Değer
Zemin su muhtevası (%)	0,19
Zemin yüzey sıcaklığı (°C)	10
Zemin hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	3,0
Zemin termal iletkenlik (W/mK)	1,5
Zemin hidrolik iletkenlik (cm/s)	2,2x10 ⁻³
Kazık termal iletkenlik (W/mK)	1,47
Kazık hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	1,8
Kazık hidrolik iletkenlik (m/gün)	1,9e-008
Borularda tanımlanan akışkan sıcaklığı (°C)	15
Hidrolik yük (m)	2,5

Tablo 5.5'te yer alan verilen doğrultusunda 360 gün sonunda akım yönündeki birinci kazıkta gözlenen verimlilik değeri yaklaşık %4 olarak öngörülmektedir.

Tablo 4.20. Mezitli ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri

Zaman (gün)	Verimlilik (%)		
	B1	B2	B3
0	100	100	100
30	7,96	7,72	7,85
60	5,98	5,46	5,62
90	5,31	4,46	4,66
120	4,93	3,79	4,01
150	4,73	3,41	3,63
180	4,57	3,06	3,28
210	4,45	2,77	2,99
240	4,37	2,60	2,79
270	4,31	2,45	2,61
300	4,26	2,32	2,44
330	4,23	2,24	2,34
360	4,20	2,17	2,24



4.3.3. Toroslar ilçesi

Toroslar ilçesinde alınan noktanın deney verileri, zemin sınıfından yararlanılarak ulaşılan termal iletkenlik ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri Tablo 5.6'da sunulmaktadır.

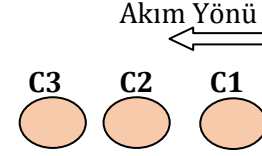
Tablo 4.21. Toroslar ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri

Parametre	Değer
Zemin su muhtevası (%)	0,17
Zemin yüzey sıcaklığı (°C)	10
Zemin hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	2,9
Zemin termal iletkenlik (W/mK)	1,6
Zemin hidrolik iletkenlik (cm/s)	10 ⁻⁸
Kazık termal iletkenlik (W/mK)	1,47
Kazık hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	1,8
Kazık hidrolik iletkenlik (m/gün)	1,9e-008
Borularda tanımlanan akışkan sıcaklığı (°C)	15
Hidrolik yük (m)	34

360 gün sonunda Toroslar ilçesi sınırları dahilinde seçilen nokta için elde edilen ısı verimlilik değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. Verilen incelendiğinde akım yönündeki birinci kazık için elde edilebileceği öngörülen ısı verimlilik değerinin yaklaşık %3 mertebesinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.22. Toroslar ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri

Zaman (gün)	Verimlilik (%)		
	C1	C2	C3
0	100	100	100
30	8,06	7,86	8,02
60	5,83	5,51	5,80
90	4,95	4,49	4,92
120	4,39	3,83	4,36
150	4,07	3,45	4,04
180	3,78	3,10	3,75
210	3,53	2,82	3,51
240	3,36	2,62	3,34
270	3,20	2,44	3,18
300	3,06	2,90	3,04
330	2,97	2,19	2,95
360	2,89	2,10	2,87



4.3.4. Yenişehir İlçesi

Yenişehir ilçesinde alınan noktanın deney verileri, zemin sınıfından yararlanılarak ulaşılan termal iletkenlik ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri Tablo 5.8’de sunulmaktadır.

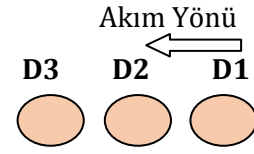
Tablo 4.23. Yenişehir ilçesinde seçilen nokta için zemin parametreleri

Parametre	Değer
Zemin su muhtevası (%)	0,17
Zemin yüzey sıcaklığı (°C)	10
Zemin hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	2,6
Zemin termal iletkenlik (W/mK)	2,5
Zemin hidrolik iletkenlik (cm/s)	0,054
Kazık termal iletkenlik (W/mK)	1,47
Kazık hacimsel ısı kapasitesi (MJ/m ³ K)	1,8
Kazık hidrolik iletkenlik (m/gün)	1,9e-008
Borularda tanımlanan akışkan sıcaklığı (°C)	15
Hidrolik yük (m)	8,5

360 gün sonunda Yenişehir ilçesi sınırları dahilinde seçilen nokta için elde edilen ısı verimlilik değerleri Tablo 5.9’ da verilmiştir. Verilen incelendiğinde akım yönündeki birinci kazık için elde edilebileceği öngörülen ısı verimlilik değerinin yaklaşık %40 mertebesinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.24. Yenişehir ilçesinde seçilen nokta için ısı verimlilik değerleri

Zaman (gün)	Verimlilik (%)		
	D1	D2	D3
0	100	100	100
30	41,00	18,33	15,20
60	40,66	17,99	14,87
90	40,64	17,97	14,85
120	40,63	17,97	14,85
150	40,62	17,96	14,85
180	40,61	17,96	14,84
210	40,60	17,95	14,84
240	40,59	17,95	14,84
270	40,59	17,95	14,84
300	40,58	17,95	14,83
330	40,57	17,94	14,83
360	40,57	17,94	14,83



Mersin ilinde alınan dört noktanın enerji verimliliği değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek verimliliğin Yenişehir ilçesindeki noktadan elde edildiği görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sığ zemin tabakalarının belli bir derinlikten itibaren sıcaklığının yıl içinde sabit olması ve mevsimsel etkilere maruz kalmaması, bu ortamda mevcut olan ısı potansiyelinin yapılarda gerek ısınma gerekse soğutma amaçlı olarak kullanılabilmesine imkân vermektedir. Bu durumdan faydalanmak amacıyla sığ zemin ısı kazanım sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler yatay ya da düşey şekilde zemine yerleştirilen enerji transfer boruları ile ısı potansiyelinin kullanıma alınabilmesini hedeflemektedir. Enerji kazıkları olarak adlandırılan ısı sistemleri ise bahsedilen ısı kazanım sistemlerinin bir varyasyonu olarak ortaya çıkmıştır.

Bilindiği üzere geoteknik açıdan yeterli taşıma gücüne sahip zemin tabakalarının yüzeysel temel yapımına müsaade etmeyecek mertebedeki derinliklerde yer alması veya statik sistemleri bakımından farklı oturmalara hassas olan yapılarda fore kazıklı temeller sıklıkla kullanılmaktadır. Binaların inşasında temel altına veya inşaat alanının etrafında imal edilen kazıklar sadece temelin taşıma kapasitesinin artırılmasında veya inşaat alanının etrafındaki toprak yapısının desteklenmesinin ötesinde, yaşam alanlarımızı oluşturan binaların iklimlendirme ihtiyacının tamamının ya da bir bölümünün karşılanması amacıyla yenilikçi bir yaklaşım ile kullanılabilir. Bu şekilde kullanılan kazıklara literatürde “enerji kazıkları” adı verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, bina temellerinde kullanılan fore kazıklara entegre edilen ısı transfer döngü borularıyla oluşturulabilen enerji kazıklarının ısı performansları incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan GeoStudio paket programının TEMP/W ve SEEP/W modülleri kullanılarak enerji kazıklarının ısı kazanım performansına yeraltı suyunun etkisini saptamak amacıyla sayısal modellemeler yapılmıştır. Enerji kazıkları nedeniyle sığ zeminde meydana gelen ısı yayılımları farklı yeraltı suyu akım durumları için karşılaştırılarak zeminden kazanılabilecek ısı enerjisi değerleri üzerinde yeraltı suyunun etkisi ele alınmıştır.

Tekil kazık üzerinde yapılan plan ve kesit analizlerde yeraltı suyu mevcut olmayan ya da durağan su tablası durumlarında kazık çevresinde ısı yayılımının beklenildiği üzere simetrik ve dairesel tarzda geliştiği ancak yeraltı suyu akımı dikkate alındığında ısı yayılım profilindeki simetrinin ortadan kalktığı görülmektedir. Akiferdeki ortalama bir akış hızı için enerji yönünden verimlilik değerleri gerek yaz gerekse kış dönemi kullanımı için kıyaslandığında hareketli yer altı suyu ortamındaki tekil bir kazık için enerji kazanımı akiferde akım olmadığındaki duruma göre daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yeraltı suyu enerji kazığı tarafından sığ zemine enjekte edilen ısıyı akım yönünde taşımakta ve çevreleyen zemini büyük oranda yer altı suyu sıcaklığına getirdiğinden zamana bağlı olarak tekil enerji kazığı ile çıkarılabilecek enerji miktarında daha az bir düşüşe yol açtığı belirlenmiştir. Tekil kazık modelinde gerçekleştirilen ısı aktarım analizlerinde kazığın alt uç kesiminde en etkin şekilde ısı transferi olduğu

görülmüştür. Bu etkinlik kazık üst ucuna doğru yaklaşıldığında azalmaktadır. Kazığın üst noktası ise zemin yüzeyine tanımlanmış olan sınır sıcaklık koşulundan etkilendiği için termal akı değeri alt ve orta derinliklerde görülen ısı transfer değerlerine kıyasla daha düşük gerçekleşmiştir.

Enerji kazıklarında grup etkisi akım yönüne dik ya da paralel tarzda yerleştirilmiş üçer adet kazık üzerinde hem plan hem de kesit analizler yapılmak suretiyle araştırılmıştır. Analizler statik su tablası ve yeraltı suyu akım durumları için gerçekleştirilmiş olup her iki durumda da kazıklar arası ısı etkileşim nedeniyle zeminden çıkarılabilecek enerji miktarlarında kayıplar söz konusu olmaktadır. Verimsel açıdan en büyük kaybın statik su tablası durumu için yapılan analizlerde grubun ortasında bulunan kazıkta olduğu ortaya konulmaktadır. Akiferde akım gerçekleştiğinde ise akım yönüne paralel konumlandırılan kazık sırasında birinci, ikinci ve üçüncü kazıklarda enerji verimliliği 30 günlük çalışma periyodu sonunda ilk çalışma günü baz alındığında sırasıyla %63,4, %49,3 ve %48,9 değerlerine gerilemektedir. Türkiye genelinde yaz ya da kış dönemi için ısı kazanım sistemlerinin sezonsal kullanım süreleri ortalama doksan gün olarak kabul edilebilir. Bu doğrultuda analizi yapılan enerji kazığı sisteminin doksan günlük bir çalışma sezonunda sürekli olarak aynı transfer yönünde ısı aktarımı yapması durumunda akım yönündeki ilk kazığın verimi %57 mertebelerinde olmakta, ikinci ve üçüncü kazıklarda ise sırasıyla %32,2 ve %29,9 değerlerine düşmektedir. Görüldüğü üzere özellikle akım yönüne paralel tarzda konumlanan gruplarda kazık-zemin arası ısı transferinin ikinci ve üçüncü kazıklarda ısı etkileşim nedeniyle ciddi oranda azalması enerji kazıklı sistemlerin tasarımında göz önüne alınmalıdır. Akım yönüne dik konumlandırılmış olan üçlü kazık sırasında ise kazıklar arası ısı etkileşim azalmakta, bu durum ise kazık grubunun ısı verimliliğini arttırmaktadır. Yapılan analizler neticesinde akiferdeki akıma dik olan enerji kazıklarının tamamında görülen termal akı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Otuz günlük çalışma süreci sonunda her üç kazıkta da enerji verimleri %64 düzeyinde gerçekleşmiştir. Doksan günlük sezon kullanımı sonunda ise verimlilik değerleri %56 mertebesinde. Bu bilgiler doğrultusunda akım yönüne paralel konumlandırılan kazık grubunda çalışma sezonu sonunda eşdeğer ısı verimlilik %39,6 değerine gerilemekte, sezonluk ortalama verim ise %69,8 olarak tahmin edilmektedir. Akım yönüne dik tarzda konumlandırılan enerji kazığı grubunda ise sezon sonu ısı verimlilik değeri %56, sezonluk ortalama verim ise %78 olarak belirlenmektedir. Doksan günlük dönemsel kullanımlarda enerji kazığı sistemlerinin iki farklı çalışma durumu arasında yüz seksen gün kadar zaman bulunacağından özellikle akiferde akım koşulları bulunduğu enerji kazıkları çevresindeki zeminin sıcaklık profili doğal haline geri dönecek olup, bu durumun ısı verimliliği iyileştireceği düşünülmektedir. Sayısal analizlerden elde edilen bulgular ışığında Mersin ili kentsel yerleşim alanı için, hidrojeolojik koşullar ve lokal zemin özellikleri de dikkate alınarak dört farklı ilçeden seçilen temsili noktalar için analizler

yapılmıştır. Seçilen noktalar Akdeniz, Mezitli, Toroslar ve Yenişehir ilçeleri sınırları içinde yer almaktadır. Yapılan modelleme çalışmaları, akiferdeki yeraltı suyu akım yönüne paralel şekilde konumlandırıldığı kabul edilen üçlü kazık grupları için plan analiz yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde Akdeniz İlçesi için enerji kazığı gurubunun doksan günlük çalışma sezonu sonunda ısı verimi ortalama %17, Mezitli ve Toroslar ilçeleri sınırlarındaki noktaların her ikisi için %4,8, Yenişehir ilçesi için %24,5 değerine gerilemiştir. Mersin ili kentsel yerleşim alanında alınan dört noktada uygulanacak enerji kazığı sistemi için ısı verimlilik değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek verimliliğin Yenişehir ilçesindeki noktadan elde edildiği görülmektedir. Geoteknik ve hidrojeolojik veriler incelendiğinde en yüksek hidrolik eğim değerlerinin Yenişehir ilçesi için belirlenen noktada oluşması, uygulanabilmesi muhtemel bir enerji kazıklı temel sisteminin ısıl yönden verimli olabileceğini ve konutlarda iklimlendirme amacıyla sürdürülebilir düzeyde faaliyet gösterebileceğini ortaya koymaktadır. İncelenen grubun akım yönüne dik olarak seçilmesi durumunda enerji verimlilik değerleri daha yüksek çıkacağından karelej tarzında uygulanabilecek enerji kazığı sistemleri ile sığ zeminlerin ısı potansiyelinden daha verimli ve sürdürülebilir düzeyde faydalanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Banks, D. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. Blackwell Publishing: USA, 2008; p
- [2] Özkaya, T. , Enerji Kazıklarında Isıl Performansın Parametrik İncelenmesi ve Kazık Aralıklarının Isıl Performansa Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [3] Claesson, H. , Eskilson, P. , Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole: Thermal Analysis and Dimensioning Rules, Energy 1988, 13, 509–27.
- [4] Lee, C. , Lam, HN. , Determination of groundwater velocity in thermal response test analysis, 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Effstock 2009: Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability, Stockholm, Sweden, 2009, 8p.
- [5] Pahud, D. , Matthey ,B. , Comparison of the thermal performance of double u-pipe borehole heat exchangers measured in situ, Energ Buildings 2001, 33, 503–7.
- [6] Chiasson, A. , Rees, SJ. , Spitler, J., A preliminary assessment of the effects of ground-water flow on closed-loop ground-source heat pumps, ASHRAE Trans 2000, 106, 380–93.
- [7] Wang, H. , Qi, C. , Du, H. , et al. , Thermal performance of borehole heat exchanger under groundwater flow: a case study from Baoding, Energ Buildings 2009, 41, 1368–73.
- [8] TRNSYS, Transient System Simulation Tool Ver. 16. Thermal Energy System Specialists, LLC, 2009.
- [9] Nam, Y. , Ooka, R. , Hwang, S., Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, Energ Buildings 2008, 40, 2133–40.
- [10] Fan, R. , Jiang, Y. , Yao, Y. , et al. , A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection, Energy 2007 ,32, 2199–209.
- [11] Katzenbach, R. , Clauss, F. , Waberseck, T. , et al., Coupled numerical simulation of geothermal energy systems, 12th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)., Goa, India, 2008, pp. 1170–79.
- [12] Gehlin , S., Hellstrom, G., Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock, Renewable Energy 2003 , 28, 2221–38.
- [13] Clausen , H. , Implementation of simulations on the influence of different boundary conditions on the thermal performance of geothermal probes, Doktora Tezi, Institute of Building Energetics, University of Stuttgart, 2008, 94 p.
- [14] Abdelaziz, S.L., Olgun, C.G., Martin, J.R. , Desing and operational consideration of geothermal energy piles. Geo-Frontiers 2011, GSP 211, 450-459 .
- [15] Özudogru, T., Brettmann, T., Olgun, C. G., Martin J. R., Senol, A., Thermal Conductivity Testing of Energy piles: Field testing and numerical modeling, GeoCongress 2012, 4436-4445.

- [16] Park, H., Lee, S.R., Yoon S., Choi, C.C., Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation, , *Applied Energy* 2013, 103, 12-24.
- [17] Zarrella, A., Capozza, A., De Carli. M., Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers: A simulation-based comparison. *Applied Energy* 2013, 112,358-370.
- [18] Zarrella, A., Carli, M. D., Galgaro, A. ,Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube, *Applied Thermal Engineering* 2013,61, 301-310.
- [19] Loveridge, F., Powrie, W., 2D thermal resistance of pile heat exchangers, *Geothermics*, 50, 122-135.
- [20] Bezyan, B., Porkhial, S., Mehrizi, A.A., 3-D simulation of heat transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration, *Applied Thermal Engineering* 2015, 87, 655-668.
- [21] Franco, A., Moffat, R., Toledo M., Herrera, P., Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles. *Renewable Energy* 2016, 86, 985-992.
- [22]COMSOL, COMSOL Multiphysics User's Guide. Version 4.3a, 2012.
- [23] John S. McCartney, Ph.D.1, A.M. ASCE, Daniel LaHaise2, Thomas LaHaise2, and Joshua Rosenberg3, S.M. ASCE Art of Foundation Engineering Practice Congress Application of Geoexchange Experience to Geothermal Foundations
- [24] Cui P., Li X., Man Y., Fang Z., Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils, *Applied Energy* 2011, 88, 4113–4119.
- [25] Knellwolf C., Peron, H., Laloui L., Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2011, 137, 890-902.
- [26] Batini N., Rotta Loria A.F., Conti P. , Testi D., Grassi W. ,Laloui L., Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions, *Applied Thermal Engineering* 2015, 86, 199-213.
- [27] Gashti, E.H.N., Malaska M., Kujala K., Evaluation of thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heating/cooling operations, *Engineering Structures* 2014, 75, 363–373.
- [28] Fadejeva, J., Kurnitskia, J., Geothermal energy piles and boreholes design with heat pump in awhole building simulation software, *Energy and Buildings* 2015, 106 ,23–34.
- [29] Description of the IDA ICE Borehole Model. Internal Report, Equa, 2013.
- [30] Kaltreider, C., Krarti, M., McCartney, J. , Heat transfer analysis of thermo-active foundations, *Energy and Buildings* 2015,86, 492–501.
- [31] Cecinato, F., Loveridge, F.A. , Influences on the thermal efficiency of energy piles, *Energy* 2015 ,82, 1021-1033.

- [32] Gashti, E.H.N., Uotinen, V.M. , Kujala K., Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study, *Energy and Buildings* 2014, 69 ,165–174.
- [33] Gashti, E.H.N., Malaska M., Kujala K., Analysis of thermo-active pile structures and their performance undergroundwater flow conditions, *Energy and Buildings* 2015 ,105 ,1–8.
- [34] Rivera, J.A. , Blum, P., Bayer, P., Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers, *Applied Energy* 2015,146 ,421–433.
- [35] Suryatriyastuti, M.E. , Mroueh, H. , Burlon, S., Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, 16, 3344– 3354.
- [36] Loria , A.F.R., Gunawan, A., Shi , C., Laloui , L., W.W. Ng , C., Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads, *Geomechanics for Energy and the Environment* 2015, 1, 1–15.
- [37] Moel, M., Bach, P.M., Bouazza, A., Singh, R.M., Sun , J.L.O., Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010, 14 ,2683–2696.
- [38] Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., Ochifuji, K., Field performance of an energy pile system for space heating , *Energy and Buildings* 2007, 39 , 517–524.
- [39]Cervera , C.P., Ground thermal modelling and analysis of energy pile foundations, Yüksek Lisans Tezi, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Aalto University, Finland, 2013.
- [40] Tahiroglu, E., 3D Finite element analsis for geothermal energy in environmental geotecincs, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [41] Tamyerli, U., Jeotermal enerjiden elektrik üretiminin irdelenmesi “Örnek Çalışma: Kütahya – Simav jeotermal sahası, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2007.
- [42] Jeotermal Enerji, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal> (17.03.2018).
- [43] Geothermal pile foundations, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Geothermal_pile_foundations, (10.02.2018).
- [44] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A., *Renewable Energy Technology, and Environment Economics*, Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN:978-3-540-70949-7 .
- [45] Batchelor, T., Geothermal energy: a major renewable energy resource, *Civil Engineering Innovation* 2007, 1, 69-74.
- [46] Collie, M.J., *Geothermal energy: recent developments*, United States: N. p., 1978, Web.
- [47] Boennec, O., Shallow ground energy systems, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Energy* 2008, 161 , 57–61.

- [48] Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004, What Is Geothermal Energy? Istituto di Geoscienze Georisorse, CNR, Pisa, Italy. Available via the International Geothermal Association, <http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php>, last accessed September 2007.
- [49] Boyle, G., Renewable Energy. 2nd Edition; Oxford University Press: Oxford, 2004; 452 pp.
- [50] Lund, J., Hitaveita Reykjavíkur and the Nesjavellir geothermal co-generation power plant, Geo-Heat Center (GHC) Bulletin 2005 , 19–24.
- [51] Stefansson, V., Axelsson, G., Sustainable utilization of geothermal energy resources, United Nations University, Geothermal Training Programme IGC2003 –Short Course, 2003, Iceland.
- [52] Bergman, T. L., Lavine, A.S., Incropera, F. P., Dewitt, D. P. , Fundamentals of Heat and Mass Transfer . 7th ed.; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2011; 1039 p.
- [53] Al-Khoury, R. , Computational modeling of shallow geothermal systems, CRC Press: Netherlands, 2011; 254 p.
- [54] Andersland, Orlando B., Ladanyi, B., An introduction to Frozen Ground Engineering, Chapman & Hall: New York, 1994; 352 p.
- [55] Özüdoğru, T.Y., The use of geothermal heat exchanger piles for sustainable design, Doktora Tezi, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [56] Wendl, M.C., Theoretical Foundations of Conduction and Convection Heat Transfer. Textbook Committee: USA, 2012; 226 p.
- [57] Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., Thomas, H. R., Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. Renewable and Sustainable Energy 2000, 4, 213–265.
- [58] Sundberg, J., Thermal Properties of Soils and Rocks, Swedish Geotechnical Institute :Report No 35, 1988.
- [59] Sumner, J.A., The Norwich heat pump. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1948 ,158/1, 22–29, with discussion, 39–51.
- [60] Heap, R.D., Heat Pumps. E. & F.N. Spon Ltd.: London, 1979; 155 p.
- [61] Hancıoğlu , E., Hepbaşlı, A., Hoşgör, R., Ülkemizde Jeotermal Isı Pompalarının Fizibilitesi, YEKSEM'2001 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Elektrik Mühendisleri Odası, 18-21 Ocak 2001; 53-60.
- [62] McCartney, J.S., Engineering performance of energy foundations, Pan-Am CGS Geotechnical Conf.: USA, 2011.
- [63] Brandl, H., Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique 2006, 56, 81-122.
- [64] Ground-Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities , http://www.pnl.gov/fta/2_ground.htm (2001).

- [65] Sanner, B., Shallow geothermal energy, *GHC Bulletin* 2001, 19-25.
- [66] Bozis, D., Papakostas, K., Kyriakis, N., On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles, *Energy and Buildings* 2011, 43, 1020–1029.
- [67] Halozan, H., Rieberer, R., Direct-evaporation ground-coupled heat pumps. 21st International Institute of Refrigeration (IIR) Congress of Refrigeration (Sector: Heat Pumps), Washington DC, 17–22 August 2003.
- [68] Seung Rae, L., Energy Piles - Piles as Heat Exchangers -, Department of Civil and Environmental Engineering,
www.researchgate.net/profile/Lyesse-Laloui/publication/271714467_Centrifuge_modelling_of_heating_effects_on_energy_pile_performance_in_saturated_sand/links/5632465808aefa44c3684a23/Centrifuge-modelling-of-heating-effects-on-energy-pile-performance-in-saturated-sand.pdf . (03.03.2018)
- [69] Fare, O.G., Basu P., A practical heat transfer model for geothermal piles, *Energy and Buildings* 2013, 66, 470–479.
- [70] Suryatriyastuti, M.E., Mroueh, H., Burlon, S., Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, 16, 3344– 3354.
- [71] SFS-EN ISO 14688-2:2005. Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soils. Part 2: Principles for a classification
- [72] Loveridge, F. , The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems. Doktora tezi, University of Southampton, İngiltere, 2012.
- [73] Mimouni, T., Laloui, L., Behaviour of a group of energy piles , *Canadian Geotechnical Journal* 2015, 52, 1913-1929.
- [74] Loria, A.F.R. , Laloui, L., The interaction factor method for energy pile groups *Computers and Geotechnics* 2016 ,80, 121-137.
- [75] Donna, A.D., Loria, A.F.R., Laloui, L., Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads, *Computers and Geotechnics* 2016, 72, 126–142.
- [76] Loria, A. F. R., Laloui, L., Thermally induced group effects among energy piles, *Géotechnique* 2017, 67, 374–393.
- [77] Choi, J.C., Park, J., Lee, S.R., Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays, *Renewable Energy* 2013, 52, 230-240.
- [78] Diao, N., Li, Q., Fang, Z., Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences* 2004, 43, 1203-1211.

- [79] Fan, R., Jiang, Y., Yao, Y., Shiming, D., Ma, Z., A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection, *Energy* 2007, 32, 2199-2209.
- [80] Wang, H., Qi, C., Du, H., Gu, J., Thermal performance of borehole heat exchanger under groundwater flow: A case study from Baoding , *Energy and Buildings* 2009, 41, 1368-1373.
- [81] GeoStudio, TEMP/W User Manual. GEO-SLOPE International Ltd; 2007.
- [82] GeoStudio, SEEP/W User Manual. GEO-SLOPE International Ltd; 2007.
- [83] Hatipoglu, Z., Motz , L.H., Bayari, C.S., Characterization of the groundwater flow system in the hillside and coastal aquifers of the Mersin-Tarsus region (Turkey) , *Hydrogeology Journal* 2009, 17, 1761-1778.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı :Fatma DÜLGER CANOĞULLARI

Doğum Tarihi :22.06.1992

E-mail :fatma.dulger@toros.edu.tr

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	2010-2014
Yüksek Lisans	İnşaat Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2015-
Doktora			

Görevler :

Görev Ünvanı	1. Görev Yeri	Yıl
Arş. Gör.	Toros Üniversitesi	2017-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Yeraltı Suyu Akış Özelliklerinin Enerji Kazıklarının Isıl Verimliliği Üzerindeki Etkisinin Modellenmesi (Tam Metin) , IMSEC 2017.

2.

3.