T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNA TEMELİ ALTI TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDEKİ ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

NURULLAH KAYACI

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI-PROSES PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. HAKAN DEMİR

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNA TEMELİ ALTI TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDEKİ ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Nurullah KAYACI tarafından hazırlanan tez çalışması 17.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail TEKE

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman ISIKAN

Marmara Üniversitesi _____

Bu çalışma, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 0472.STZ.2013-2 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam, danışmanım Sayın Prof. Dr. Hakan DEMİR'e teşekkür ve minnetimi özellikle belirtmek isterim. Ayrıca tez çalışmam boyunca bilgisini, tecrübesini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen yardımcı danışmanım Sayın Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla yakından ilgilenen Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE ve Prof. Dr. Özden AĞRA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme jürimde bulunan ve eleştirileriyle yol gösteren Sayın Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU'na ve Prof. Dr. Osman ISIKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

SANTEZ projesi kapsamında çalışmamızı destekleyen Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Mir-Arge firmasına teşekkürlerimi sunarım. Mir-Arge firması çalışanlarına özellikle Sayın Ruşen Can Acet'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Mir-Arge firmasında çalışmış ve şu an Singapur'da enerji araştırma enstitüsünde doktora çalışmalarına devam eden Sayın Barış Burak KANBUR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bana her daim destek veren tüm mesai arkadaşlarıma başta Sayın Dr. Mustafa Kemal SEVİNDİR, Alişan GÖNÜL, Dr. Mahdi Tabatabaei MALAZİ, Abdulkerim OKBAZ ve Atalay YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs, 2018

Nurullah KAYACI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xi

ŞEKİL LİSTESİ xii

ÇİZELGE LİSTESİ xvii

ÖZET xviii

ABSTRACT xxi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 5

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR 6

2.1 Yüzeysel Jeotermal Enerji 7
2.1.1 Doğrudan kullanım 7
2.1.2 Toprak altında ısıl enerji depolama 8
2.1.3 Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TKIP) 8
2.1.3.1 Yüzey su ısı pompası sistemi (SWHP) 10
2.1.3.2 Yüzey sığ TKIP sistemi (Superficial-GSHP) 10
2.1.3.3 Sığ TKIP sistemi (Shallow-GSHP) 12
2.1.3.3.1 Açık sistemler 12
2.1.3.3.2 Kapalı sistemler 13

BÖLÜM 3

TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR 15

3.1 Analitik Modeller 15
3.1.1 Ingersoll Yaklaşımı 15
3.1.2 IGSHPA Yaklaşımı 17
3.1.3 Kavanaugh Yaklaşımı 19
3.1.4 Hart ve Couvillion Yaklaşımı 20
3.1.5 Chung, Jung, Rangel Modeli 22
3.1.6 Mukerji, Tagavi, Murphy Yaklaşımı 23
3.2 Sayısal Modeller 24
3.2.1 Hellstrom Modeli 24
3.2.2 Thornton vd.'nin Hellstrom Modeli Uygulaması 24
3.2.3 Eskilson Modeli 25
3.2.4 Rottmayer, Beckman ve Mitchell Modeli 25
3.2.5 Mei ve Emerson Modeli 25
3.2.6 Shonder ve Beck Modeli 25
3.2.7 Muraya Modeli 26
3.2.8 Piechowski Modeli 26
3.2.9 Negiz, Hastaoğlu, Heidemann Modeli 27
3.2.10 Chiasson, Spitler, Rees, Smith Modeli 28
3.3 Son Yıllarda Geliştirilen Sayısal Modeller 30
3.4 Son Yıllarda Geliştirilen Deneysel Çalışmalar 36

BÖLÜM 4

SAYISAL ÇALIŞMALAR 57

4.1 Toprak Üst Yüzeyi Atmosfere Açık ve Borunun Toprağa Gömülmesi 57
4.1.1 Geliştirilen modelin kabulleri ve sınır şartları 57
4.1.2 Zamana ve derinliğe göre toprak sıcaklığının hesaplanması 59
4.1.3 Toprak yüzeyindeki enerji dengesi 61
4.1.3.1 Kar örtüsünden dolayı yüzeyde meydana gelen ısı akısı 62
4.1.3.2 Buharlaşmadan dolayı yüzeyde meydana gelen ısı akısı 62
4.1.3.3 Taşınımla meydana gelen ısı akısı 63
4.1.3.4 Işınımla yüzeyden yayılan ve yüzeye gelen ısı akıları 64
4.1.3.5 Güneş ışınımıyla yüzeye gelen ısı akısı 64
4.1.3.6 Yağış olma durumunda meydana gelen ısı akısı 65
4.1.4 Akışkan sıcaklığının boru boyunca değişiminin incelenmesi 66
4.1.5 Problemin sonlu farklar yöntemiyle çözümü 67
4.1.5.1 Zamana bağlı iki boyutlu ısı iletimi ve ADI yöntemi 68
4.1.5.2 Thomas Algoritması 70
4.1.6 MATLAB Programında Modelin Geliştirilmesi ve Çözümü 71
4.1.6.1 Isıtma Sezonu 71
4.1.6.2 Isıtma ve Soğutma Sezonu 73
4.1.6.2.1 Geliştirilen Modelin Tanıtımı 74
4.1.6.2.2 Ekonomik Analiz ve Referans Fonksiyon 77
4.2 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline (Radye Temel) Isı Değiştirici Borularının Gömülmesi Durumu 80
4.2.1 Simülasyon Çalışmasının Özeti 82
4.2.2 Geliştirilen Modelin Tanıtımı 83

4.2.3 Ekonomik analiz ve referans fonksiyon 90
4.3 Simülasyon Çalışmaları 92
4.3.1 Isıtma Sezonuna ait Simülasyon Çalışması 92
4.3.2 Isıtma ve Soğutma Sezonuna ait Simülasyon Çalışması 94
4.3.3 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline Yerleştirilen Isı Değiştiricisine ait Simülasyon Sonuçları 127
4.4 Sonuçlar 100
4.4.1 Isıtma Sezonunun Simülasyon Sonuçları 100
4.4.2 Isıtma ve Soğutma Sezonunun Simülasyon Sonuçları 111
4.4.3 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline Yerleştirilen Isı Değiştiricisine ait Simülasyon Sonuçları 127

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 137

5.1 Deney Tesisatının Kurulması Öncesindeki Çalışmalar 137
5.2 Deney Tesisatının Kurulumunda temel altı çalışmalar 140
5.3 Deney Tesisatının Kurulumunda Bina Dışı Çalışmalar 147
5.4 Deney Tesisatının Kurulumunda Bina İçi Çalışmalar 152
5.4.1 İnşaat ve Borulama 152
5.4.2 Isı pompası tesisatının tanıtımı 156
5.4.3 Isı Pompası Üzerindeki Elemanların Tanıtımı 157
5.5 Deneysel Sonuçlar 165
5.5.1 Toprak hattı uygulaması 165
5.5.2 Beton hattı uygulaması 171
5.5.3 Toprak ve beton hatlarından elde edilen sonuçlar 177

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 179

KAYNAKLAR 185

EK-A

KALİBRASYON GRAFİKLERİ 194

ÖZGEÇMİŞ 197

SİMGE LİSTESİ

A	Toplam yıllık ödenecek maliyet tutarı (₺)
A_b	Referans ofisin temel alanı (m^2)
$A_{kazı}$	Toprak ısı değiştiricisi hafriyat derinlik kesit alanı (m^2)
albedo	Toprak yüzeyinin yansıtıcılığı ile ilgili bir katsayısı
B	Bölgenin enlemi
b	Toprak yüzeyinin yutuculuğu ve aydınlatılmasına bağlı bir katsayı
C_{boru}	Boru maliyeti (₺)
C_e	Enerji tüketim maliyeti (₺)
$C_{ısı\ pompası}$	Isı pompası maliyeti (₺)
C_i	İlk yatırım maliyeti (₺)
$C_{işcilik}$	İşçilik maliyeti (₺)
$C_{kazı}$	Kazı maliyeti (₺)
C_p	Havanın sabit basınçta özgül ısısı (J/kg K),
$Cp_{,f}$	Akışkanın özgül ısısı (J/kg K),
C_{Ps}	Suyun özgül ısısı (J/kg K)
$C_{sirk\ pompası}$	Sirkülasyon pompası maliyeti (₺)
D:	Güneşin eğim açısı
D_e	Gizli ısı değişim katsayısı (m/s),
D_h	Duyulur ısı değişim katsayısı (m/s)
d_i	Borunun iç çapı (mm)
d_o	Borunun dış çapı (mm)
e	Elektriğin maliyetindeki artış oranı (-)
e_h	Kısmi buhar basıncı (Pa),
E_{komp}	Kompresörün enerji tüketimi (kW)
E_{pompa}	Sirkülasyon pompasının enerji tüketimi (kW)
E_{tarife}	Yurtiçi elektrik tüketim tarifesi (₺/kWh)
e_y	Yüzeydeki doymuş buhar basıncı (Pa)
f	Yüzey örtüsü ve toprak nemine bağlı bir katsayı
F_{ref}	Referans fonksiyon (kW/₺)
GB	Güneşin batışı (saat dakika)
GD	Güneşin doğuşu (saat dakika)
H	Simülasyon derinliği (m)
h_a	Taşınım ısı geçişi katsayısı (W/m^2 K)
H_b	Deniz seviyesinden yükseklik (m)
H_o	Referans ofisin yüksekliği (m)

H_{pompa}	Pompa basma yüksekliği (m)
I_R	Yağış yoğunluğu (kg/m^2 s)
k_f	Akışkanın ısı iletim katsayısı (W/m K)
k_{kar}	Kar tabakasının ısıl iletkenliği (W/m K)
k_s	Toprağın ısıl iletkenliği (W/m K)
$k_{t,u}$	Toprak üst tabakasının ısıl iletkenliği (W/m K)
L	Boru boyu (m)
L_{TID}	Toprak Isı değiştirici borularının uzunluğu (m)
L_b	Bölgenin boylamı
L_s	Kar örtüsünün süblimasyon gizli ısısı (J/kg)
m_f	Akışkanın kütlesel debisi (kg/s)
P	Periyot (s)
P_a	Havanın buhar basıncı (Pa)
P_s	Yüzeyin buhar basıncı (Pa)
P_s	Borular arası mesafe (m)
$\dot{Q}_{max}$	Topraktan çekilen veya bırakılan maksimum ısı yükü (kW)
Q_c	Referans ofisin soğutma yükü (kW)
Q_h	Referans ofisin ısıtma yükü (kW)
Q_{req}	Referans ofisin gerekli ısıtma ve soğutma yükü (kW)
$\dot{q}_c$	Kar örtüsünden geçen iletimle ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_e$	Buharlaşma ile meydana gelen gizli ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_{er}$	Işınımla yüzeye gelen ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_h$	Taşınımla meydana gelen duyulur ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_{ir}$	Işınımla yüzeyden yayılan ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_p$	Yağış olma durumunda meydana gelen ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_s$	Güneş ışınımıyla yüzeye gelen ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_t$	Toplam ısı akısı (W/m^2)
R	Referans boylam (Zaman dilimi*15)
Ri	Richardson sayısı,
S_{gen}	Yıllık güneş radyasyonundaki salınımın genliği (W/m^2)
S_{ort}	Yüzeydeki ortalama yıllık gelen güneş enerjisi (W/m^2)
t	Zaman (s)
T_a	Hava sıcaklığı (K)
T_{dp}	Günlük çiğ noktası sıcaklığı (K)
$T_{f,i}$	Akışkanın giriş sıcaklığı (^oC)
$T_{f,o}$	Akışkanın çıkış sıcaklığı (^oC)
T_s	Toprak sıcaklığı (^oC)
$T_{t,a}$	Toprak üst tabakasının altındaki sıcaklık (K)
$T_{t,gen}$	Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği (^oC)
$T_{t,ort}$	Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı (^oC)
T_y	Toprak veya kar örtüsünün üst yüzey sıcaklığı (K)
τ_h	Sistemin ısıtma sezonundaki toplam çalışma süresi (s)
τ_c	Sistemin soğutma sezonundaki toplam çalışma süresi (s)
U_c	Çatının toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
U_d	Kapının toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
U_f	Zeminin toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)

U_w	Duvarın toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
U_{wi}	Pencerenin toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
U_z	Yüzeyden z kadar yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
V_f	Hacimsel debi (m^3/h)
Y	Gömme derinliği (m)
Y	Gömme derinliği (m)
Y_c	Bina temel yüksekliği (m)
z	Referans yüksekliği (m)
z_0	Pürüz yüksekliği (m)
z_{kar}	Kar tabakasının kalınlığı (m)
$z_{t,u}$	Toprak üst tabakasının kalınlığı (m)
α_t	Toprağın ısıl yayıcılığı (m^2/s)
B	İntegral değişkeni
Δx	X yönündeki ilerleme (m)
Δy	Y yönündeki ilerleme (m)
Δz	Z yönündeki ilerleme (m)
Δt	Zaman adımı (s)
ε	Toprak yayıcılığı (-)
ζ	Kararlılık fonksiyonu
κ	Von Karman sabiti
φ_1	Faz farkı (rad)
ω	Açısal hız (rad)

KISALTMA LİSTESİ

ADI	Değişken yön sonlu fark çözüm yöntemi (Alternating Direction Implicit)
ASHRAE	Amerika Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği
COP	Etkinlik katsayısı (Coefficient of Performance)
NPT	Paralel boru sayısı (Number of Parallel tubes)
PLC	Programlanabilir mantıksal denetleyici (Programmable Logic Controller)
TID	Toprak Isı Değiştirici
TKDIP	Toprak Kaynaklı Dikey Isı Pompası
TKIP	Toprak Kaynaklı Isı Pompası
TKYIP	Toprak Kaynaklı Yatay Isı Pompası

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yatay toprak ısı değiştiricisi 2
Şekil 1.2 Dikey toprak ısı değiştiricisi 2
Şekil 2.1 TKIP sisteminin şematik görünümü [5] 9
Şekil 2.2 Sarmal ve helisel yatay ısı değiştirici sistemlerinin şematik görünümü 11
Şekil 2.3 Paralel ve seri yatay ısı değiştirici sistemlerinin şematik görünümü 11
Şekil 2.4 Sondaj ısı değiştirici sisteminin şematik görünümü 12
Şekil 2.5 Sığ açık TKIP sisteminin şematik görünümü [6] 13
Şekil 2.6 Sığ sondaj TKIP sistemlerinin şematik görünümü [7] 13
Şekil 2.7 Kapalı sığ sondaj ısı değiştirici bağlantılarının şematik görünümü [7] 14
Şekil 2.8 Enerji kazıkları uygulamasının şematik görünümü [7] 14
Şekil 3.1 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları 22
Şekil 3.2 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları 27
Şekil 3.3 Çözüm algoritmasının görünümü 31
Şekil 3.4 Simulasyon çalışma modelinin görünümü 34
Şekil 3.5 Kurulan deney tesisatının görünümü 36
Şekil 3.6 Kurulan deney tesisatının görünümü 37
Şekil 3.7 Kurulan deney tesisatının genel ve şematik görünümü 38
Şekil 3.8 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü 39
Şekil 3.9 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü 40
Şekil 3.10 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü 42
Şekil 3.11 Kurulan deney tesisatının görünümü 43
Şekil 4.1 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları 58
Şekil 4.2 Öngörülen toprak yüzey sıcaklığı değişimi 60
Şekil 4. 3 Boru içindeki ısı transferinin değişimi 67
Şekil 4. 4 ADI Yaklaşımı 69
Şekil 4. 5 Blok Diyagram [113] 72
Şekil 4. 6 TKIP sisteminin görünümü [5] 75
Şekil 4. 7 Blok Diyagram [5] 76
Şekil 4. 8 Nakit Akış Diyagramı 80
Şekil 4. 9 Enerji-temel sistemi 82
Şekil 4. 10 Bina temelinin altındaki toprağa (a) ve bina temeline (b) gömülü borular 84
Şekil 4. 11 Toprak ve beton ara yüzlerinin enerji dengesi 86
Şekil 4. 12 Çözüm için algoritmanın blok diyagramı 88
Şekil 4. 13 Ofisin yıl boyunca saatlik gerekli ısı ihtiyacı 93
Şekil 4. 14 İstanbul ili için meteorolojik veriler 93

Şekil 4. 15 Ofisin yıl boyunca saatlik gerekli ısı ihtiyacı 95
Şekil 4. 16 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan giriş sıcaklığının zamana göre değişimi 100
Şekil 4. 17 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi 101
Şekil 4. 18 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre toprak sıcaklığının zamana göre değişimi 101
Şekil 4. 19 Birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda giriş, çıkış ve toprak sıcaklığının zamana göre değişimi 102
Şekil 4. 20 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda toprak yüzey sıcaklığının yıllık zamana göre değişimi 102
Şekil 4. 21 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda toprak yüzeyinde meydana gelen toplam ısı akısı miktarının yıllık zamana göre değişimi 103
Şekil 4. 22 Toprağın yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı zamanla değişiminin görünümü, Taşınım(a), Buharlaşma(b), Güneş radyasyonu(c), Yayılan uzun dalga(d), Gelen uzun dalga radyasyonu(e) 104
Şekil 4. 23 Toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı etkilerinin aylık olarak değişimlerinin görünümü 105
Şekil 4. 24 Y=2 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda farklı borulararası mesafelerin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi 106
Şekil 4. 25 Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda farklı gömme derinliğinin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi 107
Şekil 4. 26 Birim boru boyundan çekilen Q̇max =21 W/m için yılın farklı aylarında toprak sıcaklığının dikeyde (a) ve yatayda (b) değişimleri 108
Şekil 4. 27 Toprak sıcaklığının ısıtma sezonunun başlangıcı (a), ortası (b), bitişi (c)'nin yıllara göre dikey olarak değişimi 109
Şekil 4. 28 Toprak sıcaklığının ısıtma sezonunun başlangıcı(a), ortası(b), bitişi(c)'nin yıllara göre yatay olarak değişimi 110
Şekil 4. 29 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan giriş sıcaklığının zamana göre değişimi 112
Şekil 4. 30 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi 113
Şekil 4. 31 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre toprak sıcaklığının zamana göre değişimi 113
Şekil 4. 32 NPT= 30 için akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklığının zamana göre değişimi 114
Şekil 4. 33 Y=2 m ve Ps=1 m'de NPT=30 için toprak yüzey sıcaklığının saatlik zamana göre değişimi 114
Şekil 4. 34 Y=2 m ve Ps=1 m'de NPT=30 için toprak yüzeyinde meydana gelen toplam ısı akısı miktarının saatlik zamana göre değişimi 115
Şekil 4. 35 Toprağın yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı zamanla değişiminin görünümü, Taşınım (a), Buharlaşma (b), Güneş radyasyonu (c), Yayılan uzun dalga (d), Gelen uzun dalga radyasyonu (e) 116

Şekil 4. 36 Toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı etkilerinin aylık olarak değişimlerinin görünümü 117
Şekil 4. 37 Ps=1 m'de NPT=20 için farklı gömme derinliğinin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi 117
Şekil 4. 38 Y=2 m'de NPT=20 için farklı borulararası mesafelerin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi 118
Şekil 4. 39 Y=2 m ve Ps=1 m'de ve NPT=20 için yılın farklı aylarında toprak sıcaklığının dikeyde (a) ve yatayda (b) değişimleri 119
Şekil 4. 40 Y=2 m, Ps=1 m ve NPT=20 için 1, 5 ve 10'uncu yılların başlangıcında (a), ortasında (b), sonunda (c) toprak sıcaklığının toprak simülasyon derinliğine göre değişimleri 120
Şekil 4. 41 Y=2 m, Ps=1 m ve NPT=20 için 1, 5 ve 10'uncu yılların başlangıcında (a), ortasında (b), sonunda (c) toprak sıcaklığının borular arası yatay mesafeye göre değişimleri 121
Şekil 4. 42 30 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi 123
Şekil 4. 43 40 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi 124
Şekil 4. 44 50 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi 125
Şekil 4. 45 Bina temelinin altındaki toprağa (a) ve Bina temeline (b) gömülü boruların zamana göre akışkan giriş, çıkış, toprak ve beton sıcaklıklarının değişimi .. 127
Şekil 4. 46 Yc = 0.80 m (a), Yc = 1 m (b) için ısıtma ve soğutma sezonunun ortasında binanın temelinde farklı derinliklere yerleştirilen borular için beton sıcaklığının değişimi 128
Şekil 4. 47 Yc = 0.75 m için ısıtma ve soğutma sezonunun ortasında, bina temelinin altındaki toprağın farklı derinliklerine yerleştirilen borular için toprak sıcaklığının değişimi 129
Şekil 4. 48 Y-Yc = 0.2 m için bina temelinin farklı derinliklerine göre toprak sıcaklığının değişimi 129
Şekil 4. 49 Boru kurulum yerleri ve paralel boru sayılarına (NPT) göre COP'nin 30 ^{o}C (a), 40 ^{o}C (b) ve 50 ^{o}C (c) yoğuşma sıcaklığına göre değişimi 131
Şekil 4. 50 30 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları 132
Şekil 4. 51 40 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları 133
Şekil 4. 52 50 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları 134
Şekil 4. 53 Boru kurulum yerleri ve paralel boru sayılarına (NPT) göre Fref'ın 30 ^{o}C (a), 40 ^{o}C (b) ve 50 ^{o}C (c) yoğuşma sıcaklığına göre değişimi 135
Şekil 5. 1 Isıl çiftlerin hazırlanması 137
Şekil 5. 2 Isıl çiftlerin veri toplama ünitesine bağlantısının yapılması 138
Şekil 5. 3 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre, veri toplayıcı 138

Şekil 5. 4 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre, Benchlink programı 139
Şekil 5. 5 Hafriyatın alınması (a), Tesviyenin yapılması (b) ve Tesviye sonrası hafriyat alanı (c) 139
Şekil 5. 6 Toprak hattı uygulaması için kazı çalışmaları ve yerleşimi 140
Şekil 5. 7 Toprak hattı uygulamasında boruların üstünün deniz kumuyla kapatılması 141
Şekil 5. 8 Alana küçük çaplı mekanik malzemenin yerleştirilmesi ve JCB ile düzleştirilmesi..... 141
Şekil 5. 9 Toprak hattına ait ısıl çiftlerin bağlanması 142
Şekil 5. 10 Grobeton dökülürken alanın görünümü 143
Şekil 5. 11 Toprak hattına ait ısıl çift yerleşimi 143
Şekil 5. 12 Beton hattı uygulaması için boruların yerleştirilmesi..... 143
Şekil 5. 13 Beton hattı uygulamasında ısıl çiftlerin bağlanması..... 144
Şekil 5. 14 Donatılı beton atılırken boruların görünümü 144
Şekil 5. 15 Bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline yerleştirilen Toprak ve Beton hatlarının şematik görünümü 145
Şekil 5. 16 Toprak hattı uygulaması için ısıl çiftlerin yatay (a) ve dikey (b) yerleşiminin görünümü 146
Şekil 5. 17 Beton hattı uygulaması için ısıl çiftlerin yatay (a) ve dikey (b) yerleşiminin görünümü 147
Şekil 5. 18 Karot delinmesi ve boruların bina içine alınması 147
Şekil 5. 19 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının görünümü 148
Şekil 5. 20 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının kaplin bağlantılarının görünümü 148
Şekil 5. 21 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin izolasyon ve ince kum ile kapatılması 149
Şekil 5. 22 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin küçük çaplı mekanik malzeme kapatılması 149
Şekil 5. 23 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin kapatıldıktan sonraki görünümü 150
Şekil 5. 24 Toprak ve Beton hatlarına ait kolektör bağlantılarının görünümü 150
Şekil 5. 25 Toprak ve Beton hatlarının bina ana giriş kapısının olduğu bölümde (a), bina malzeme giriş kapısının olduğu bölümde (b) kolektör bağlantılarının görünümü 151
Şekil 5. 26 Kolektörlerin etrafının sac levhalarla kapatılması 151
Şekil 5. 27 Kolektörlere ait izolasyon çalışmasının görünümü..... 151
Şekil 5. 28 Toprak ve Beton hatları uygulamalarına ait dönüş hatlarının görünümü ... 152
Şekil 5. 29 Toprak ve Beton hatları uygulamalarına ait dönüş hatlarının ısı pompası odasına taşınması sonrası görünümü 153
Şekil 5. 30 Tesisat odasında dönüş hatları ve ısı pompalarının kurulumunun görünümü 153
Şekil 5. 31 Isı pompası odasından ısıtma-soğutma yapılacak mahallere çekilen borulamanın görünümü..... 154
Şekil 5. 32 Toprak ve Beton hatlarının ısıtma-soğutma yapılacak mahallere taşınması ve tavan arası borulamanın görünümü 154
Şekil 5. 33 Mahallerde bulunan hava apareyleri ve bağlantılarının görünümü..... 155

Şekil 5. 34 Isı pompası tesisatının grup halinde görünümü 156
Şekil 5. 35 Bir ısı pompası üzerindeki ekipmanlar..... 157
Şekil 5. 36 IP11SS teknik verileri 159
Şekil 5. 37 Akış Kontrol Şalteri 159
Şekil 5. 38 Pompalar, (a) frekans kontrollü pompa, (b) rotorlu pompa 160
Şekil 5. 39 Pompa grafikleri (a) frekans kontrollü pompa (b) rotorlu pompa 161
Şekil 5. 40 Akümülasyon tankı (a) ve Termometre ve Barometre (b) 161
Şekil 5. 41 Pislik tutucu (a) ve hava atıcı (b)..... 162
Şekil 5. 42 Genleşme Tankı ve RTD 164
Şekil 5. 43 Türbin-tipi debimetre (a) ve PLC sistemi (b)..... 164
Şekil 5. 44 Toprak (a) ve Beton (b) hatları için ısıl çiftlerin veri kaydedicisi kullanılarak ölçümünün yapılması..... 165
Şekil 5. 45 Deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıklarının zamana göre değişimleri ... 166
Şekil 5. 46 Deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri ... 167
Şekil 5. 47 Deneysel ve teorik akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri 167
Şekil 5. 48 Yatay eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı..... 168
Şekil 5. 49 Düşey eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı..... 169
Şekil 5. 50 Topraktan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi.....170
Şekil 5. 51 Topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişimi 171
Şekil 5. 52 Deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıklarının zamana göre değişimleri ... 172
Şekil 5. 53 Deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri ... 173
Şekil 5. 54 Deneysel ve teorik akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri 173
Şekil 5. 55 Yatay eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı..... 174
Şekil 5. 56 Düşey eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı..... 175
Şekil 5. 57 Temel betonundan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi..... 176
Şekil 5. 58 Temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişimi..... 177

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar 44
Çizelge 4. 1 Referans ofisin özellikleri 92
Çizelge 4. 2 Simülasyonda kullanılan geometrik parametreler [113] 94
Çizelge 4. 3 Simülasyonda kullanılan geometrik parametreler [5] 96
Çizelge 4. 4 Isı pompası çevriminde her noktanın analizi 97
Çizelge 4. 5 Ekonomik analizin parametreleri [5] 97
Çizelge 4. 6 Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları 98
Çizelge 4. 7 Ekonomik analizde girdi parametreleri 99
Çizelge 5. 1 Isı pompası üzerinde bulunan ekipmanların kritik özellikleri 158

ÖZET

BİNA TEMELİ ALTI TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Nurullah KAYACI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Eş Danışman: Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

Yaşam alanlarında konfor şartlarının sağlanabilmesi için enerji gereksinimi kaçınılmazdır. Isıtma-soğutma yapılacak mahallerde istenen hava sıcaklıklarının elde edilmesi için genellikle elektrik, fosil yakıtlar veya biyokütle kullanılmaktadır. Bu tip enerji kaynaklarının uzun mesafelerce taşınması gerekirken, toprak enerjisi; bunların aksine, yerleşimin bulunduğu yerde ve çok miktarda mevcuttur. Toprakta ısının yavaş yavaş transfer olması ve yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olmasından dolayı derinliğe de bağlı olarak topraktaki sıcaklığın değişimi aylar hatta yıllar almaktadır. Toprağın bu düşük ısı iletkenliği, soğutma sezonundan ısıtma sezonuna bir miktar ısının aktarılmasına yani yaz aylarında toprak tarafından absorbe edilen ısının kışın kullanılmasına imkan vermektedir. Hava ile toprak arasındaki bu ilişki, binanın ısıtılmasına ve soğutulmasına yardımcı olmak için kullanılabilecek bir termal enerji potansiyelini göstermektedir.

Isıtma sezonunda toprak havadan daha yüksek sıcaklığa sahipken, soğutma sezonunda ise bunun tersi bir durum söz konusudur. Toprağın enerjisini kullanarak mahallere bu enerjinin aktarılması için toprak kaynaklı ısı pompaları geliştirilmiştir. Toprak kaynaklı ısı pompalarının tasarımında en kritik bileşen olan toprak ısı değiştiricileri, toprağa yerleştirilen ısı değiştirici borulardan oluşmaktadır. Bu ısı değiştirici boruları kullanılarak, ısıtma sezonunda toprağın enerjisi akışkana, soğutma sezonunda ise akışkandan toprağa aktarılır.

Toprak ısı değiştiricilerinin tasarımıyla ilgili önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde temelde iki analitik çözüm yöntemi vardır; Bunlar; Kelvin Çizgisel Kaynak Yöntemi ve Silindirik Kaynak Yöntemi'dir. Analitik çözüm yöntemlerinin dışında sayısal yöntemler veya her ikisinin beraber olduğu çalışmalar mevcuttur. Ancak toprak yüzeyinde meydana gelen farklı ısı akılarının (taşınım, buharlaşma, gelen-giden uzun dalga radyasyonu ve güneş radyasyonu) yani dinamik sınır koşullarının çözüme dahil edilmesi analitik yöntemlerle yapılamazken, kısmen sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

Üç boyutlu, zamana bağlı ve gerçekçi sınır koşulları meteorolojik verilerle dikkate alınarak topraktaki sıcaklık dağılımının elde edilmesi için yeni bir numerik model geliştirilmiştir. Boru ekseni boyunca sıcaklık değişimi oldukça az olduğundan, ısı iletimi denkleminin boru eksenine dik düzlemde dinamik sınır şartları da dikkate alınarak iki boyutlu çözümü gerçekleştirilmiştir. Boru boyunca iki boyutlu çözüm bölgeleri arasında enerjinin korunum yasaları kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Dinamik sınır koşulları ve denklemlerin karmaşıklığından dolayı sayısal çözüm yöntemlerinden sonlu farklar yöntemi tercih edilmiştir. Sonlu farklar yöntemlerinden Değişken Yön Kapalı (ADI) formülasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunun nedeni, bu yöntemin her zaman adımı ve ızgara aralığı için kararlı bir yapıya sahip olması ve daha büyük zaman adımları için daha az bilgisayar belleği ve işlemci gücü kullanma olanağı tanımasıdır. Değişken Yön Kapalı (ADI) formülasyon yöntemi kullanılarak elde edilen matris sistemi tridiagonal olup, çözümü Thomas algoritması kullanılarak kolaylıkla bulunabilir.

Tezin ilk aşamasında, ısıtma-soğutma yapılacak mahallin bahçesinde veya yakınlarında, üstü atmosfere açık toprağa yerleştirilen toprak ısı değiştirici boruları için bir model geliştirilmiştir. Bu mahallin ısıtma ve soğutma sezonları süresince saatlik ısı ihtiyacı HAP programı kullanılarak belirlenmiş olup, MATLAB programında geliştirilen kod sayesinde, mahallin ısıtma ve soğutma sezonlarında her saat için gerekli ısı ihtiyacına karşılık gelen akışkan giriş sıcaklığı 10 yıllık zaman diliminde simüle edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında, toprak ısı değiştiricisinin tasarımına etki eden birçok parametreler örneğin; gömme derinliği, borular arası mesafe, paralel boru sayısı (NPT), boru uzunluğu, boru çapı ve yüzey etkileri incelenmiştir. Akışkan giriş, çıkış sıcaklığı ve toprak sıcaklığının birim boru boyundan transfer edilen farklı ısı yüklerine göre değişimi incelenmiştir. 10 yıllık simülasyon çalışmasında, ısıtma ve soğutma sezonlarının 1'inci, 5'inci ve 10'uncu yıllarının başlangıç, orta ve bitişinde topraktaki yatay ve dikey sıcaklık dağılımının değişimi elde edilmiştir. MATLAB'ta geliştirilen yeni bir kod yardımıyla, akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıkları girdi parametresi olarak verilip ısı pompası çevriminde enerji analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilen enerji analizi neticesinde farklı simülasyon çalışmaları için on yıllık periyotta saatlik COP değerleri elde edilmiştir. Sonrasında, ekonomik analiz yapılarak bir optimizasyon parametresi olan referans fonksiyon(F_{ref}) tanımlanmıştır. Tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilmiştir.

Ülkemizde genellikle yatay TKIP uygulamalarında, yatay Toprak Isı Değiştirici (TID) borularının binaların bahçelerine veya binaların çevrelerine gömüldüğü görülmektedir. Hafriyat maliyetleri nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinde meydana gelen artış, kullanıcılar nezdinde, bu sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla tercih edilmemesine neden olmaktadır. Hafriyat maliyetlerini azaltmak veya önlemek için iki yöntem benimsenmiştir. Birincisi, bina inşa edilirken yatay ısı değiştirici borularını bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesiyle kazı maliyetlerini düşürmek; İkincisi, inşaat

yapılırken, yatay ısı değiştirici borularını, bina temeline yerleştirerek kazı maliyetlerini ortadan kaldırmaktır. Tezin ikinci aşamasında ise, Türkiye'de yenilenmekte olan binaların temellerinin altındaki toprağa ve temeline yerleştirilen yatay ısı değiştirici boruları için bir model geliştirilmiştir. İstanbul'da bir alışveriş merkezinin temelinin altındaki toprağa ve temeline yerleştirilen yatay ısı değiştirici boruları için MATLAB programında geliştirilen kod sayesinde bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yatay ısı değiştirici borularının kurulum yerinin, gömme derinliklerinin ve paralel boru sayılarının TKIP'nın performansına etkileri incelenmiştir. Tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsünde yeni inşa edilen 2400 m^2'lik Merkez Laboratuvar binasının temeline ve temelinin altındaki toprağa yerleştirilen yatay ısı değiştirici boruları yardımıyla binanın bir bölümünün ısıtılması ve soğutulması gerçekleştirilmiştir. Bunlar bina temeline gömülü Beton hattı ve bina temelinin altındaki toprağa gömülü Toprak hattıdır. Toprak ve beton hatları bina dışında kolektörlere bağlanarak bina içerisine alınmıştır. Bina içerisine alınan hatlar ısı pompalarına bağlanmıştır. Toprak ve beton hatlarına ait ısı pompaları, eşdeğer alana sahip iki mahalli (her mahal iki odadır) beslemektedir. Bu hatlara ait akışkan gidiş ve dönüş sıcaklıkları RTD'ler kullanılarak ölçülmüştür. Hatların dönüşlerinde Türbin-tipi debimetre kullanılarak debilerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. RTD'ler ve Türbin-tipi debimetreler PLC sistemine entegre edilerek verilerin alınması sağlanmıştır. Bina hafriyat aşamasında, bina temeline ve altındaki toprağa gömülü Beton ve Toprak hatlarının yatayda ve dikeyde sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi için birçok ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Her hat için yerleştirilen ısıl çiftler, veri toplama ünitelerine bağlanarak verilerin alınması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda, Toprak ve Beton hatları için günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 8,36 ve % 7,14 elde edilirken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 5,58 ve % 6,38 olarak elde edilmiştir. Toprak ve Beton hatlarının düşey ve yatay eksende başlangıç zamanından 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki toprakta ve temel betonunda deneysel ve teorik sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Günlük ortalama Toprak ve Beton hatlarından çekilen enerji sırasıyla 5.51 ve 4.63 kWh/gün olarak gerçekleşmiş olup, bu hatlara ait birikmiş toplam enerji de elde edilmiştir. Topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin, temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjiden yaklaşık % 15,98 oranında daha iyi sonuçlar vermiştir. Sayısal analizler kapsamında yapılan teknik ve ekonomik incelemeler sonucunda, ısı değiştirici borularının bina temelinin altındaki toprağa yerleştirildiğinde daha yüksek COP ve düşük paralel boru sayılarında daha yüksek F_{ref} değerleri elde edilmiştir. Ancak, yüksek paralel boru sayılarında (NPT≥50), ısı değiştirici borularının bina temeline (beton) yerleştirilmesinin daha uygun olduğu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toprak Isı Değiştiricisi, Toprak Kaynaklı Isı Pompası, COP, Binalarda Enerji Performansı, Referans Fonksiyon

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN GROUND HEAT EXCHANGERS UNDER BUILDING FOUNDATION

Nurullah KAYACI

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Co-Adviser: Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

The need for energy is compulsory in order to provide comfort conditions in living spaces. In general, electricity, fossil fuels or biomass are used to obtain the desirable air temperatures in living spaces for heating and cooling. While such energy sources need long distance transportation, ground energy exists in abundance in settlement areas. As the heat in the ground gets transferred slowly and the ground has greater heat storage capacity, the temperature change in the ground takes months and even years depending on the depth. Low thermal conductivity of the ground enables the transfer of the some heat from the cooling season to heating season, i.e. the opportunity to use the heat obtained in summer in winter. This relationship between the air and ground represents a thermal energy potential as an aid to heat and cool a building.

In the heating season, the ground has a higher temperature than the air whereas in the cooling season it is vice versa. In order to transfer this energy to living spaces by using ground energy, Ground Source Heat Pumps (GSHPs) are developed. In the design of GSHPs, Ground Heat Exchangers (GHEs) as the most critical component consist of heat exchanger pipes buried in soil. By using these heat exchanger pipes, the energy of the ground is transferred into fluid in the heating season and it is vice versa in the cooling season. When previous research on the design of GHEs is studied, there are two analytical solution methods in principal, namely Kelvin Line-Source Method and Cylindrical Source Method. There are numerical methods apart from the analytical

solution methods as well as studies that include both methods. However, many heat fluxes on the soil surface (convection, evaporation, longwave and solar radiation), that is, dynamic boundary conditions are not included in the solution with analytical methods, and numerical methods are employed to a certain extent.

A numerical model is developed with realistic boundary conditions using meteorological data to solve transient-three dimensional temperature distribution in soil. Since the temperature gradient along the pipe axis is quite small, heat transfer inside the soil along the pipe axis is neglected. Thus, the heat transfer equations in the soil are solved by considering two dimensional space (in a plane perpendicular to pipe axis) and dynamic boundary conditions. . The heat transfer equations are associated with one another by employing the law of conservation of energy between two dimensional solution regions along the pipe. Finite difference methods among the numerical solutions methods are preferred due to the dynamic boundary conditions and complexity of the equations. Alternating-direction implicit (ADI) formulation method among the finite difference methods is employed as this method displays a consistent structure for each time step and grid size, and allows for less need of computer memory and processor power for greater time steps. The matrix system obtained by using the ADI formulation method is tridiagonal and the solution can be easily found using the Thomas algorithm.

At the first stage of the thesis, a model is designed for GHEs buried in the ground, the surface of which is open to the atmosphere in or around the garden of the buildings to be heated or cooled. The hourly heat need of this building during the heating and cooling seasons is determined with HAP software, and thanks to the code written in MATLAB, the fluid inlet temperature corresponding to the hourly heat need of the living space in heating and cooling seasons is simulated for a ten-year period. Several parameters which have an impact on the design of the GHE, such as the burial depth, pipe spacing, number of parallel tubes (NPT), pipe length, pipe diameter and surface effects, are studied in the simulation studies. The hourly fluid inlet and outlet temperatures in the pipe and soil temperatures around the pipe in accordance with the various heat loads transferred from unit pipe lengths are analyzed. Horizontal and vertical temperature distribution in the soil at the beginning, middle and end of the first, fifth and tenth year of the heating and cooling seasons during the ten-year simulation study are obtained. Fluid inlet and outlet temperatures and the soil temperatures as input parameters are provided, and then the energy analysis in the heat pump cycle is carried out with a new code developed in MATLAB. As a result, hourly COP values for a ten-year period are obtained for various simulation studies. Afterwards, an economic analysis is performed and the reference function, which is an optimization parameter, is defined. Reference functions for all simulation studies are acquired.

In the implementations of GSHPs in Turkey, it is seen that horizontal GHEs are generally buried in the gardens or surroundings of buildings. The increase in initial investment costs due to the excavation works makes the users avoid employing these systems in comparison with the conventional systems. In order to diminish or avoid the excavation costs, two methods are adopted. Firstly, the excavation cost is reduced by placing heat exchanger pipes in the ground while the building is constructed. Secondly, heat exchanger pipes are laid in the foundation of the building during the construction to eliminate excavation costs. At the second stage of the thesis, a model is designed for the

horizontal heat exchanger pipes laid in the ground under the foundations and in the foundations of the buildings reconstructed in Turkey. An optimization study is carried out for the heat exchanger pipes laid in the ground under the foundation and in the foundation of a shopping mall in Istanbul thanks to a code written in MATLAB. The effect of the installation place of the horizontal heat exchanger pipes, the burial depth and the NPTs on GSHP performance is studied. Reference functions for all simulation studies are obtained.

As part of the experimental studies, horizontal heat exchanger pipes are placed in the ground under the foundation and in the foundation of the newly built 2400 square meter Central Laboratory building at Yıldız Technical University, Davutpaşa Campus and a section of the building is heated and cooled. These are Concrete lines buried in the foundation of the building and Ground lines buried in the ground under the foundation of the building. Ground and Concrete lines are let into the building by connecting them with the collectors outside the building and then these lines are attached to the heat pumps. The heat pumps of the Ground and Concrete lines feed two locations (each location consists of two rooms) with equivalent area values. The fluid inlet and outlet temperatures of these lines are measured by using RTDs. At the outlet of the lines, turbine flow meters are used to measure the flow rates. RTDs and turbine flow meters are integrated with the PLC system to import the data. During the excavation work of the building, several thermocouples are emplaced to determine the horizontal and vertical temperature changes in the Ground and Concrete lines buried in the foundation and in the ground under the foundation. Thermocouples for each line are linked with the data logger units so that data can be acquired.

As a result of the experimental studies, while maximum differences are obtained as 8.36% and 7.14% between the daily average experimental and theoretical fluid inlet temperatures for the Ground and Concrete lines, they are 5.58% and 6.38% for the daily average experimental and theoretical fluid outlet temperatures, respectively. The experimental and theoretical temperature distributions of the Ground and Concrete lines on vertical and horizontal axes are gathered 10,100, 250, 500 and 864 hours following the starting time and are seen to be in good agreement with each other. The energy drawn from the daily average Ground and Concrete lines is 5.51 and 4.63 kWh/ day, respectively, and the cumulative total energy of these lines is also obtained. The cumulative total energy drawn from the Ground has proven to provide approximately 15.98 % better results than the cumulative total energy drawn from the Concrete. As a result of the technical and economical analyzes carried out within the scope of numerical analysis, higher COP at all time and higher F_{ref} values at the low NPT are obtained when the heat exchanger pipes are placed in the ground under the building foundation. However, it is seen that the placement of the heat exchanger tubes inside the building foundation (concrete) is more suitable for high NPT (NPT≥50).

Keywords: Ground Heat Exchanger, Ground Source Heat Pump, COP, Energy Performance in Building, Reference Function

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda fosil yakıtlardan elde edilen enerji kullanımı arttıkça, küresel ısınma ve CO_2 emisyonundan kaynaklanan hava kirliliği ciddi bir sorun haline gelmiştir. Bu problemin çözülmesinde en etkili yöntem ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır. Jeotermal enerji, yenilenebilir enerji kaynakları içinde yüksek verimlilik, daha çevreci ve kararlı bir performansa sahiptir. Günümüzde jeotermal enerji elektrik üretimi, mahal ısıtma ve soğutmasında kullanılmakta olup, uygulamada iki temel yöntemi vardır;

- Yüzeysel Jeotermal Enerji (derinlik < 400 m)
- Derin Jeotermal Enerji (derinlik > 400 m)'dir.

Yüzeysel Jeotermal Enerji teknolojisi, genelde mahalin ısıtılması ve soğutulmasında kullanılıp, üç şekilde uygulanmaktadır:

- Doğrudan kullanım
- Toprak altında ısıl enerji depolama
- Toprak kaynaklı ısı pompası'dır.

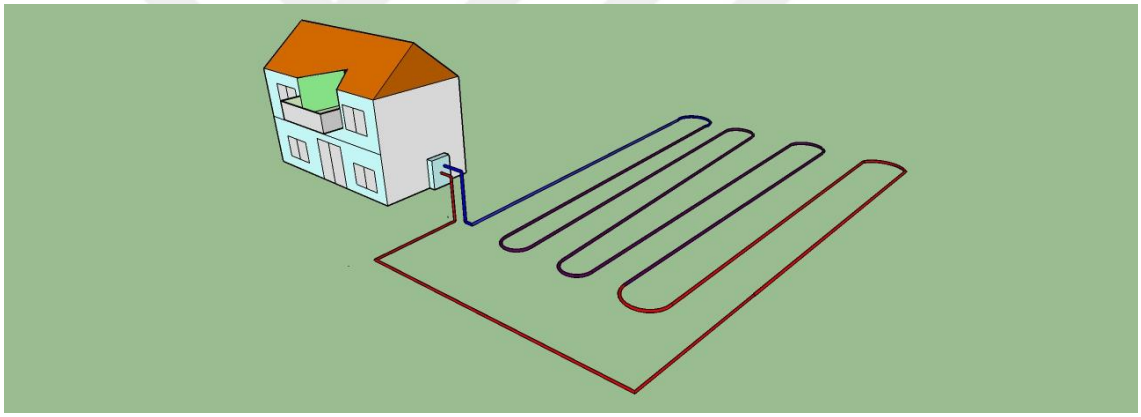
Toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP), ilk olarak 1860'lı yıllarda W. Thomson ve J. D. Everett tarafından uygulanmış olmasına rağmen; toprağı, ısı kaynağı olarak ısı pompasında uygulayan Heinrich Zoeley, ilk patent başvurusunu 1912'de İsviçre'de yapmış olduğundan, bu tarih TKIP için resmi başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bununla beraber, modern TKIP araştırmaları 1970'lerin sonlarında deneysel çalışmalarla başlamış

ve 1990'lı yıllarda bilgisayar teknolojisinin kullanılmasıyla sayısal çalışmalar da hız kazanmıştır [1].

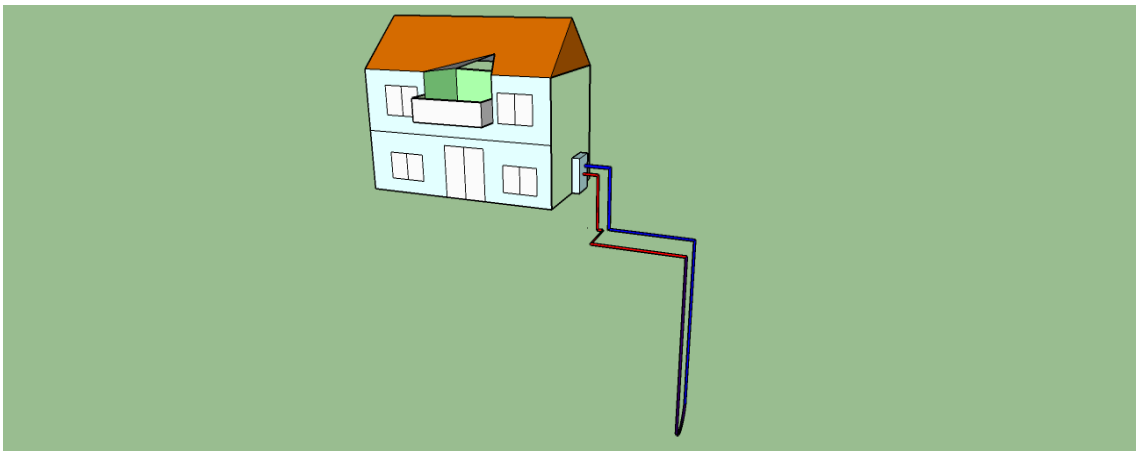
TKIP'ında toprak, ısıtma sezonunda yani kışları ısı kaynağı olarak kullanılırken, soğutma sezonunda yani yazları ısı çukuru olarak kullanılır. TKIP konutlarda ısıtma, soğutma ve nem kontrolü sağlamakta, aynı zamanda da evsel sıcak su ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. TKIP sistemlerinde üç temel bileşen bulunmaktadır. Bunlar;

- Toprak Isı Değiştiricileri (TID)
- Isı Pompası
- Isı Dağıtım Sistemi'dir

Toprak ısı değiştiricileri Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de görüldüğü üzere temelde yatay ve dikey olmak üzere iki tip uygulaması vardır.



Şekil 1.1 Yatay toprak ısı değiştiricisi



Şekil 1.2 Dikey toprak ısı değiştiricisi

Bununla beraber, TID'si iki şekilde kullanılmaktadır. Bunlar;

- İkincil Akışkan: Toprak ile ısı pompası arasındaki ısı transferi ikincil bir akışkan ile sağlanır.
- Doğrudan Genleşmeli: TID'si doğrudan ısıtma yapılıyorsa buharlaştırıcı, soğutma yapılıyorsa yoğuşturucu olarak kullanılır.

TKIP'nın diğer bileşini olan ısı pompası ise 3 temel komponente sahiptir. Bunlar,

- Evaporator
- Kompresör
- Kondenser'dir.

Isı dağıtım sistemi, bina içindeki mahalleri ısıtmak veya soğutmak için kullanılan sistemlerdir. Binanın ısıtılıp soğutulmasında toprağın kullanılmasının temel nedeni, kışın ısı kaynağı veya yazın ısı çukuru olan toprağın, kararlı bir yapıya ve yüksek ısıl kapasiteye sahip olmasıdır. Toprağın 2-3 metre derinliklerdeki sıcaklıklığı, o bölgenin yıllık ortalama hava sıcaklığına denk gelmektedir. Bununla beraber, topraktaki sıcaklık değişimi çok az olduğundan havayla karşılaştırıldığında daha kararlı bir kaynak ve çukur sıcaklığına sahiptir. Uygun sıcaklık aralıklarında çalışan TKIP, Hava Kaynaklı Isı Pompası (HKIP)'yla karşılaştırıldığında aynı iklim şartları için daha az enerji tüketir ve daha yüksek Etkinlik katsayısı (COP) değerlerine sahiptir [1].

TKIP'nın en önemli dezavantajı ilk yatırım maliyetinin yüksek olması olduğundan literatürde yapılan çalışmalar genellikle TID'lerinin üzerine yoğunlaşmıştır. TID'sinin tasarımı, boyutlandırılması, yeni kurulum yöntemlerinin geliştirilmesi ve toprağın boru çevresinde ısı iletim katsayısını arttırmak için bazı ek malzemeler (additives) kullanılması oldukça önem arz etmektedir.

Toprağın analitik olarak modellenerek TID'sinde akışkan çıkış sıcaklığının hesaplanması üzerine birçok model geliştirilmiştir. Ancak, analitik çözümlerde birçok kabuller ve farazi yaklaşımlar bulunduğundan detaylı bir çözüm gerçekleştirilememektedir. Günümüzde bilgisayar gücü ve teknolojisinin gelişmesiyle beraber daha karmaşık ve daha doğru çözümlemeler yapabilen sayısal çözüm yöntemleri kullanılmaya başlanmış ve geliştirilmeye devam etmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Elektrik ve ısı enerjisi üretmek için kullanılan fosil yakıtların kullanımı arttıkça, küresel ısınma ve yüksek CO_2 emisyonundan kaynaklanan hava kirliliği ciddi bir sorun haline gelmiştir. Dünyamızı tehdit eden bu problemin en etkili çözümlerinden biriyse, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları içinde jeotermal enerji; yüksek verimlilik, çevreci ve kararlı bir performansa sahip olmasından dolayı elektrik üretimi, mahal ısıtma ve soğutmasında kullanılmaktadır. Konvansiyonel klima sistemleri ve HKIP'ları yerine TKIP'larının kullanılmasıyla ısıtma modunda % 30 ile % 70 arasında, soğutma modunda % 20 ile % 50 arasında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki en temel amaç, TKIP sistemlerinin çevreci ve yenilenebilir olmasının yanında enerji tüketiminin düşürülmesinde de önemli bir yere sahip olmasıdır.

Yatay TKIP sistemi, özellikle geniş bir alana uygulandığında, maliyet-verimlilik açısından büyük avantajlar sağlar. Ülkemizde genellikle yatay TKIP uygulamaları incelendiğinde, yatay toprak ısı değiştirici borularının binaların bahçelerine veya çevrelerine gömüldüğü görülmektedir. Büyük kent merkezlerinde özellikle İstanbul'da önemli bir nüfus artışının olması, çoğu zaman yeraltı otoparkına sahip ancak yatay TKIP sistemlerinin uygulanabileceği yeterli alanları olmayan yüksek katlı bina ve işyeri inşa edilmektedir. Yatay TKIP sistemlerinin uygulanabilecek yeterli alan sorununun yanında, hâlihazırda kazı maliyetleri nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinde meydana gelen artış, bu sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla kullanıcılar nezdinde tercih edilmemesine neden olmaktadır. Bu tezin amacı, Türkiye'de kentsel dönüşümle yenilenmekte olan binaların temellerinin altındaki toprağa ve temeline, yatay ısı değiştirici boruları yerleştirilerek TKIP sistemlerinin önündeki en önemli engel olan kazı maliyetlerini azaltmak veya ortadan kaldırmaktır. Buna ek olarak, bu sistemlerin kullanımıyla, Türkiye'de yakın zamanda binalarda uygulanacak olan zorunlu enerji kimlik belgesi için enerjiyi etkin kullanan ve düşük karbonlu ev ve işyerleri elde etmektir.

Üst yüzeyi atmosfere açık olan toprağa ve bina temeline yerleştirilen yatay TID borularının performansını incelemek ve geliştirilen sayısal modelin geçerliliğini kanıtlamak amacıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsünde yeni inşa edilen

2400 m^{2}'lik Merkez Laboratuvar binasının temeline ve temelinin altındaki toprağa yatay TID boruları yerleştirilmiştir. Bu denli büyük ölçekli bir deneysel çalışmanın yapılmasındaki amaç, alışveriş merkezleri, kamu binaları ya da yüksek katlı binalarda bu sistemlerin uygulanabileceği ve kullanılabileceğini göstermektir.

1.3 Hipotez

Ülkemizde genellikle yatay TKIP uygulamaları incelendiğinde, yatay toprak ısı değiştirici borularının binaların bahçelerine veya çevrelerine gömüldüğü görülmektedir. Büyük kent merkezlerinde özellikle İstanbul'da önemli bir nüfus artışının olması, çoğu zaman yeraltı otoparkına sahip ancak yatay TKIP sistemlerinin uygulanabileceği yeterli alanları olmayan yüksek katlı bina ve işyeri inşa edilmektedir. Yatay TKIP sistemlerinin uygulanabilecek yeterli alan sorununun yanında, hâlihazırda kazı maliyetleri nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinde meydana gelen artış, temiz enerji olan TKIP sistemlerini geleneksel sistemlere kıyasla, kullanıcılar nezdinde tercih edilmemesine neden olmaktadır. Bu problemi çözmek için binaların temellerinin altındaki toprağa ve temeline, yatay ısı değiştirici boruları yerleştirilerek TKIP sistemlerinin önündeki en önemli engel olan kazı maliyetlerini azaltması veya ortadan kaldırılması fikri geliştirilmiştir.

Bu fikir ışığında, hem geliştirilen sayısal modelin kanıtlanmasında hem de büyük ölçekli bir alana sahip olan Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsündeki Merkez Laboratuvar binasının temeline uygulanabilirliğinin gösterilmesi noktasında çalışmalar yapılmıştır.

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR

Son yıllarda elektrik enerjisi üretmek için kullanılan fosil yakıtların talebindeki artış, fosil yakıt fiyatlarında ciddi bir artışa sebep olmaktadır. Daha da önemlisi, fosil yakıtların talebindeki artış, CO_2 emisyonundan dolayı küresel ısınma ve hava kirliliği gibi birçok çevresel problemlere neden olmaktadır. Dünyamızı bekleyen bu problemin en etkili çözümlerinden biriyse, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır. Çevre dostu, yüksek verimlilik ve kararlı performans üstünlüğüne sahip olan jeotermal enerji, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biridir. Bu nedenle, jeotermal enerjinin kullanılması, fosil yakıtların kullanımını azaltarak CO2 emisyonlarının makul bir seviyede kalmasına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Dünya çapındaki elektrik talebi arttıkça, dünya genelinde doğrudan elektrik maliyeti ve dolayısıyla hava kirliliğine ilişkin dolaylı maliyet artacak ve bu da enerji verimliliği yüksek teknolojiye olan talebi arttıracaktır.

Fisher ve Rees [2]'e göre, konut uygulamalarında TKIP sistemlerinin kullanılması, toplam konut elektrik tüketimini % 40'a düşürebilir. Hughes [3] çalışmasında hem ev hem de ticari uygulamalar dahil edilerek, TKIP'nın kullanımının toplam konut ve ticari elektrik kullanımını % 30-40 oranında azaltacağını ileri sürmüştür. Çalışmada, TKIP sistemlerinin kullanılmasıyla ABD'de toplam elektrik tüketiminde % 4-6 gibi bir azalma gerçekleşmesi durumunda, doğrudan maliyetlerdeki yıllık 3 milyar dolarlık bir tasarruf, 1.37×10^7 ton CO_2, 1.18×10^4 ton NO ve 2.89×10^4 ton SO_2'lik bir hava kirliliğin önüne geçileceğini söylemiştir. TKIP sistemlerinin yaygınlaştırılması devletler nezdinde, insanlar için önemli mali tasarruflar, yaşanabilir çevre ve uzun yaşam sağlayacağı görülmektedir.

Toprağın farklı derinliklerinde toprak sıcaklığı değişmektedir. İklim şartlarından dolayı toprak yüzeyinde meydana gelen ısı transferi, toprak sıcaklığını 0-15 m toprak derinliklerine kadar etkilemektedir. 15-100 m arasındaki toprak derinliklerindeyse, toprak sıcaklığı, daha derinlerden gelen ısı akısı ve hava sıcaklığından etkilenir. Ortalama toprak sıcaklığı her 100 m derinliğe inildiğinde 2.5 ^{o}C arttığı bilinmektedir [4].

Günümüzde jeotermal enerji elektrik üretimi, mahal ısıtma ve soğutmasında kullanılmakta olup, uygulamada iki temel yöntemi vardır;

- Yüzeysel Jeotermal Enerji (derinlik < 400 m)
- Derin Jeotermal Enerji (derinlik > 400 m)'dir.

2.1 Yüzeysel Jeotermal Enerji

Yüzeysel jeotermal enerji düşük sıcaklık aralığında birçok uygulamalar için uygundur. Yüzeysel jeotermal enerji teknolojisi, genelde mahallin ısıtılması ve soğutulmasında kullanılıp, üç şekilde uygulanmaktadır:

- Doğrudan kullanım (Direct Use)
- Toprak altında ısıl enerji depolama (UTES)
- Toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP)'dır.

2.1.1 Doğrudan kullanım

Özellikle fay hatlarının yoğun olduğu sıcak kaplıca bölgelerinde jeotermal enerji doğrudan kullanılmaktadır. Ürün kurutma, su ürünleri yetiştiriciliği, sera, buz eritme gibi birçok alanda jeotermal su doğrudan kullanılmaktadır. Aynı şekilde yeraltı suyu, toprağa yatay veya dikey yerleştirilen TID'leri sayesinde mahallin soğutulmasında kullanılmaktadır. Diğer bir uygulama ise, binanın zemin, tavan veya duvarlarına yerleştirilen paneller sayesinde yeraltı suyu, bu panellerin bulunduğu mahallerde dolaştırılarak mahallin soğutulması sağlanmaktadır.

Jeotermal enerjinin doğrudan kullanıldığı diğer uygulamalar ise kaldırımların, köprülerin, yolların, hastanelerin acil girişlerinin ve havaalanlarında donma ve buzlanmanın önüne geçmek için kullanılmaktadır.

2.1.2 Toprak altında ısıl enerji depolama

Toprak, sıcağı veya soğuğu depolamak için bir termal rezervuar olarak kullanılmaktadır. Jeotermal, güneş veya atık ısılardan meydana gelen ısı kaynağı, yeraltında depolanmakta ve daha sonra kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, toprak altında ısıl enerji depolama özellikle uzun zamanlı ve büyük sistemlerin depolamasında uygun olduğu bilinmektedir.

Amaca yönelik kullanılan toprak altında ısıl enerji depolama sistemi bazı bölgelerde sıcağı depolama, bazı bölgelerde ise soğuğu depolama olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer hava sıcaklığı toprak sıcaklığından yüksekse sıcak depolama, hava sıcaklığı toprak sıcaklığından düşükse soğuk depolama olarak kullanılmaktadır.

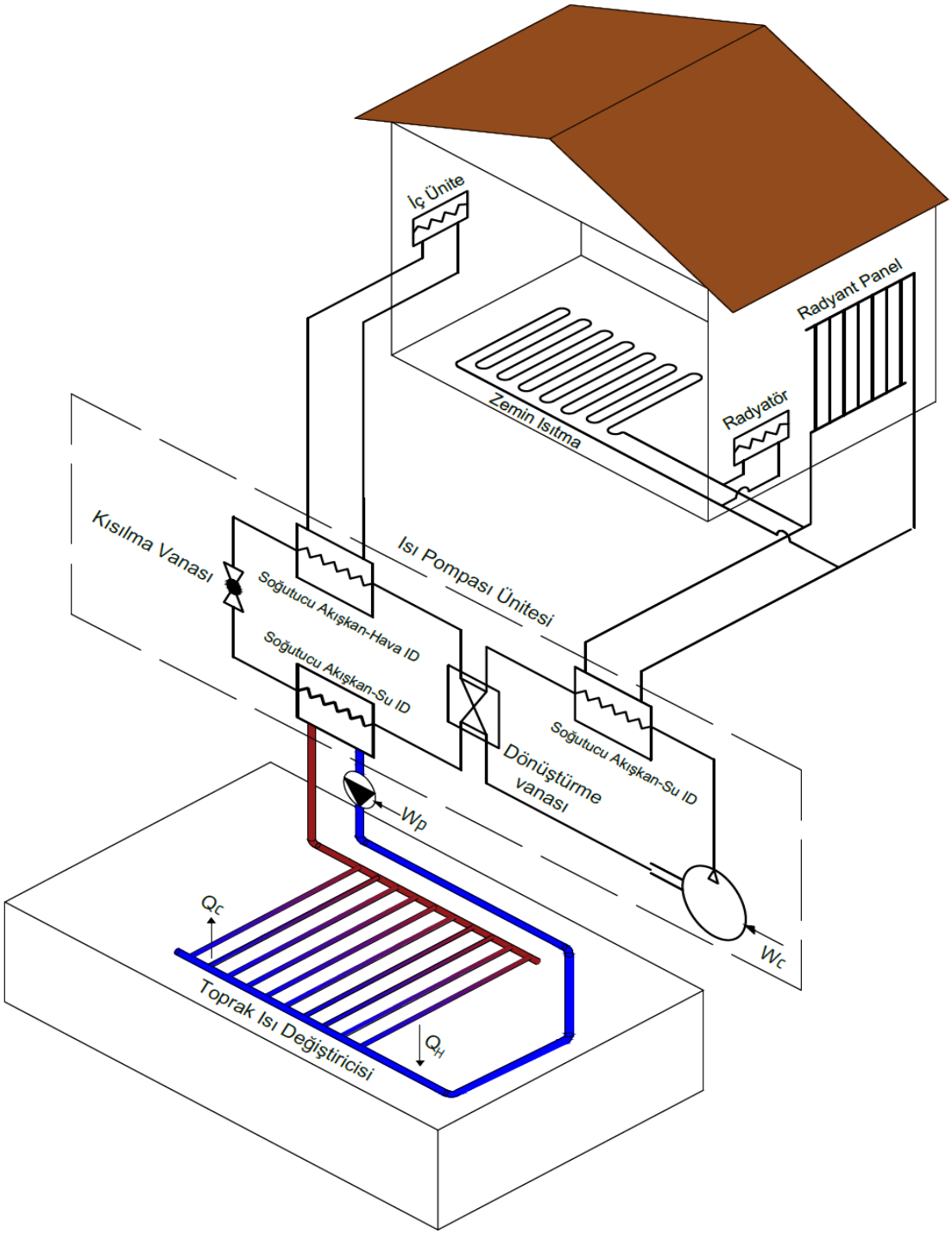
Endüstride atık ısı depolama oldukça önem arz etmekte, bu sistem atık ısı kazanımı için oldukça cazip olmaktadır. Atık ısı çevreye bırakılması yerine toprağa depolanabilir ve ihtiyaç olduğunda kullanılabilir. Bu atık ısının depolanması sayesinde mahal ısıtılması için harcanan yakıttan da tasarruf sağlanmaktadır.

Ek olarak, toprak altında ısıl enerji depolama sistemi tasarlanırken toprağın yapısı ve çevresel etkiler dikkate alınmalıdır.

2.1.3 Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TKIP)

TKIP bilinen HKIP ile benzerdir. Yani iki sistemde ısıtma ve soğutma yapmak için soğutma çevrimini kullanmaktadır. TKIP sisteminin dış ünitesi toprak iken, HKIP sistemininki dış havadır. TKIP sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekilde görülen sistemin iç ünitesi, zeminden ve duvardan radyant ısıtma, radyatör veya fan-coil ile yapılırken soğutması fan-coil, tavandan veya duvardan radyantla gerçekleşmektedir.

Isıtma sezonunda toprak, ısı kaynağı olarak kullanılır. Isı pompası sisteminin evaporatörü olan toprakta, akışkan dolaştırılarak ısı çekilir ve su-soğutucu akışkan ısı değiştiricisinde su soğutucu akışkana ısıyı aktarır. Aktarılan enerji ilk olarak kompresör sonra da kondenser kısmına girer. Binanın ihtiyacını karşılamak için bina iç ünitesine göre değişen (zeminden ve duvardan radyant ısıtma, radyatör veya fan-coil) kondenserden ısı binaya aktarılır.



Şekil 2.1 TKIP sisteminin şematik görünümü [5]

Soğutma sezonunda toprak, ısı çukuru olarak kullanılır. Mahalden çekilen ısı, ısı pompası yardımıyla toprağa bırakılır. Isı pompası sisteminde 3 yollu vana kullanılarak ısıtma sezonundaki evaporatör kısmı kondenser, kondenser kısmı evapöratör olarak değiştirilir. Böylece, soğutma sezonunda mahalde bulunan iç ünite, genelde duvardan veya tavandan radyant soğutma ve fan-coil olurken, dış ünite toprak olmaktadır. Bina Isı

pompası kullanılmadan da yeraltı suyu dolaştırılarak bina soğutulabilmektedir. Isıtma ve soğutma sezonlarında HKIP yerine TKIP sistemlerinin kullanılması, ısı pompasının daha az iş tüketmesine ve Etkinlik katsayısının (COP) değerinin artmasını sağlamaktadır.

TKIP kurulumlarına göre kategorize edilmiştir. Genel olarak, toprak yüzeyinin üstüne (nehir, havuz ve göl gibi), toprak yüzeyinin altına yüzeysel sığ toprağa (<20 m) ve toprak yüzeyinin altına sığ toprağa (30-400 m) kurulmaktadır.

2.1.3.1 Yüzey su ısı pompası sistemi (SWHP)

Yüzeysel suda depolanan jeotermal enerjiyi kullanan bir teknolojidir. Genelde havuz, nehir veya kanallardaki yüzey suyunu açık sistemde dolaştırmasıyla kazanım sağlanmaktadır. Bu açık sistemde tıkanma ve korozyon problemiyle sıklıkla karşılaşılmaktadır. Kullanılan suyun kalitesi araştırmalı ve doğru boru malzemesi kullanılmalıdır. Bu sistemlerde PVC boru kullanılmamalı, HDPE boruları tercih edilmelidir.

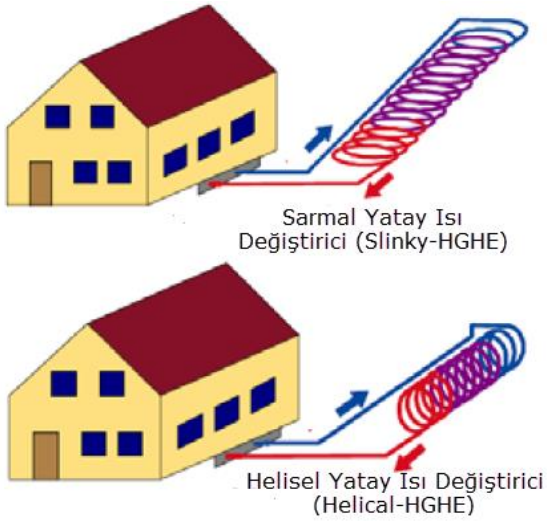
Genellikle bina soğutma için ve ısı pompasıyla entegre edildiğinde ısıtma için de kullanılabilen SWHP sistemleri, ilk kurulum maliyetlerinin düşüklüğü ve yüksek ekonomik karlılığa sahiptir. Ancak, günümüzde çevresel nedenlerden dolayı pek yaygın olarak kullanılmamaktadır.

2.1.3.2 Yüzey sığ TKIP sistemi (Superficial-GSHP)

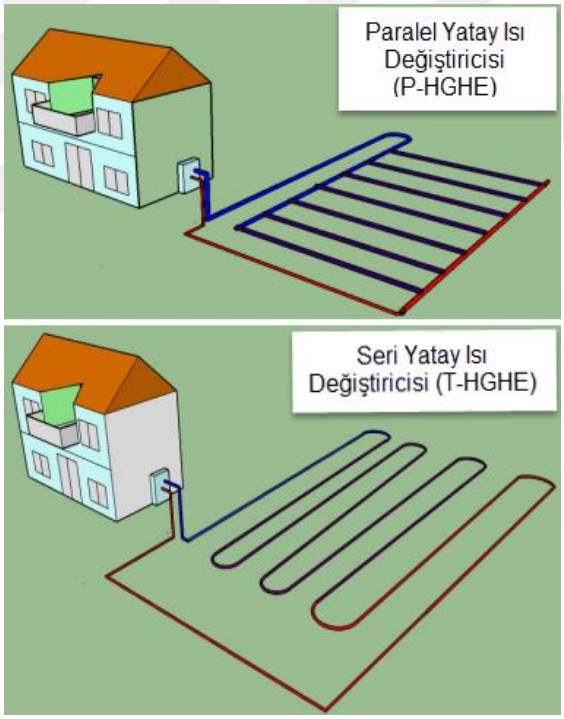
Bu sistemler 10 m derinliğe kadar kurulmakta ve toprak yüzeyinde meydana gelen ısı akılarından etkilenmektedir. Sistemin uygulanacağı yerde alan problemi olmadığında borular yatay olarak yerleştirilmektedir. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de görüldüğü üzere, yatay yerleşimde borular düz veya sarmal olarak uygulanmaktadır. Sarmal olarak yerleştirilen borular sarmal yatay ve helisel yatay olarak ayrılırken, düz borular paralel ve seri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bununla birlikte, Şekil 2.4'de görüldüğü üzere, sistemin uygulanacağı yerde alan problemi olduğunda dikey sondaj ısı değiştiricileri kurulmaktadır. Bunlar 10 m ile 30 m arasında değişen derinliklere yerleştirilir ve bu derinliklerde toprak sıcaklığının yıl

boyunca kısmen kararlı bir yapıda oldukları bilinmektedir. Bundan dolayı, dikey sistemler yatay sistemlere göre daha kararlı bir performansa sahip olmaktadır.

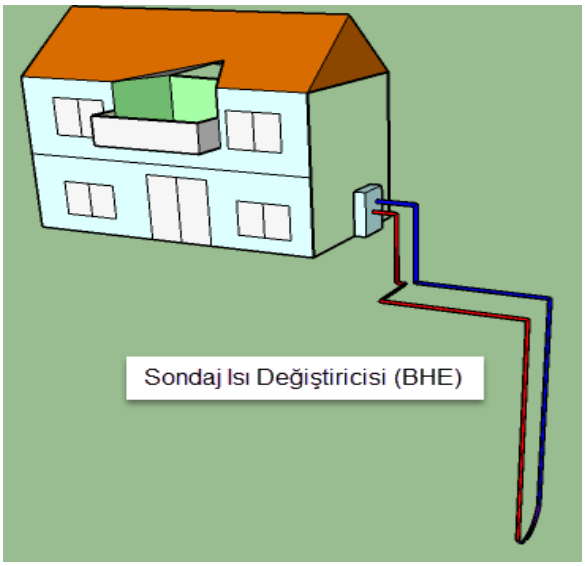


Şekil 2.2 Sarmal ve helisel yatay ısı değiştirici sistemlerinin şematik görünümü



Şekil 2.3 Paralel ve seri yatay ısı değiştirici sistemlerinin şematik görünümü

Yüzey sığ TKIP sistemleri kolay ve hızlı kurulumu ve düşük ilk yatırım maliyetine sahip olması avantajı iken, anakent şehirlerde sistemin uygulanacağı yerde kullanım alanının sınırlı olması dezavantajıdır.



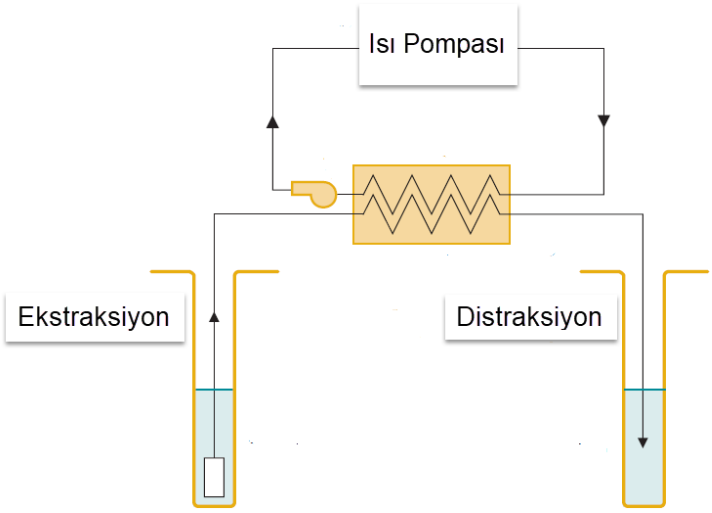
Şekil 2.4 Sondaj ısı değiştirici sisteminin şematik görünümü

2.1.3.3 Sığ TKIP sistemi (Shallow-GSHP)

Yukarıda bahsedilen iki farklı TKIP sistemine kıyasla, daha derinlere (30-400 m) sondaj çalışması yapılarak kurulan bu sistemler, arazi kullanımının baş gösterdiği bazı kentsel bölgelerde sıkça kullanılmaktadır. Bu dikey sondaj, jeolojik katmanların katı matrisinde depolanan jeotermal enerjiyi kullanmak için yapılmaktadır. Bu tür TKIP sistemleri, kararlı toprak sıcaklığı profili olması nedeniyle daha iyi bir performansa sahiptir. Enerji kullanımına göre bu tür sistemler temelde iki kategoride incelenmektedir.

2.1.3.3.1 Açık sistemler

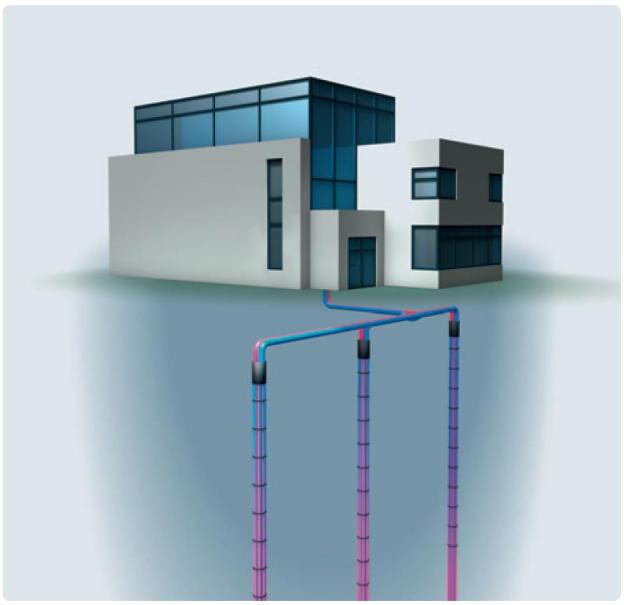
Açık sistemler için en az iki sondaj gereklidir: biri suyun ekstraksiyonu için diğeri suyun distraksiyonu içindir (Şekil 2.5). Su, yüksek geçirgenliğe sahip bir jeolojik katman üzerinden dolaşır. Yani, bu jeolojik katman doğrudan ısı kaynağı/çukuru olarak kullanılır. Yeraltı sularının kimyasal özellikleri dikkate alınmalı çünkü tıkanma ve paslanma gibi bazı sorunlar meydana gelmektedir. Kapalı sistemlerle karşılaştırıldığında, açık sistemler daha iyi bir termal performansa sahiptir. Bunun nedeni, ısı taşıyan akışkan çevresindeki katmanla doğrudan temas halinde olmasıdır.



Şekil 2.5 Sığ açık TKIP sisteminin şematik görünümü [6]

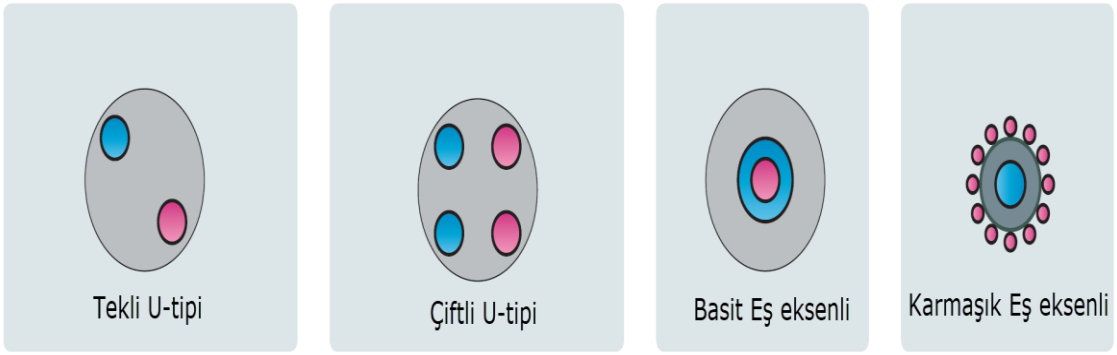
2.1.3.3.2 Kapalı sistemler

Kapalı sistemlerde sondaj yapılan kuyu içeresine bir ısı eşanjörü yerleştirilir. Isı eşanjörü ve sondaj arasındaki boşluk, termal teması sağlamak amacıyla, kum veya geliştirilmiş beton gibi bazı dolgu malzemeleri (additives) kullanılarak doldurulur. Isı değiştiricilerinde dolaşan akışkan ısıyı yerden ısı pompasına veya tersine taşıyarak kapalı sığ sondaj TKIP sisteminin çalışması sağlanmaktadır. Kapalı sığ sondaj sisteminin termal verimliliği, ısı eşanjörünün tipine, dolgu malzemesine, eşanjör borularının uzunluğu ve çapı gibi birçok faktöre bağlıdır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Sığ sondaj TKIP sistemlerinin şematik görünümü [7]

Kapalı sığ sondaj TKIP sisteminin ısı değiştirici temelde iki şekilde karşımıza çıkmaktadır: U-tipi ve Eş eksenli-tipi. Uygulamada U-tipinin iki çeşidi vardır: Tekli U-tipi ve Çiftli U-tipi. Diğer taraftan Eş eksenli-tipi de 2 şekilde sınıflandırılmıştır: Basit Eş eksenli ve Karmaşık Eş eksenlidir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Kapalı sığ sondaj ısı değiştirici bağlantılarının şematik görünümü [7]

TKIP sistemlerinde bir diğer önemli uygulama ise "enerji kazıkları" dır (Şekil 2.8). Bina temeline bağlanan enerji kazıkları binanın ısıtılması ve soğutulmasında etkin kullanım sağlamakta ve kapalı sığ sondaj TKIP sistemiyle ilk yatırım maliyeti açısından karşılaştırıldığında % 30 daha iyi sonuç verdiği bulunmuştur.



Şekil 2.8 Enerji kazıkları uygulamasının şematik görünümü [7]

BÖLÜM 3

TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1 Analitik Modeller

3.1.1 Ingersoll Yaklaşımı

Ingersoll vd. [8] Kelvin'in (1861) çizgisel kaynak teorisini baz alarak sonsuz ortamda herhangi bir noktadaki sıcaklığı elde etmiştir. Başlangıçta ortamın üniform bir sıcaklık dağılımında, sonsuz uzunlukta ve sabit ısı oranındaki çizgisel kaynak ya da kuyunun o anda çalıştırılmaya başlandığını öngörerek yapmıştır. Aşağıdaki denklem kullanılarak kuyu veya çizgisel kaynaktan istenilen uzaklıktaki bölgede aktarılan ısı miktarı ve sıcaklık değişimini zaman ve toprak özellikleri esas alınarak hesaplanır.

$$T - T_0 = \frac{Q'}{2\pi k_t} \int_X^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{Q'}{2\pi k_t} I(X) \tag{3.1}$$

$$X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_t t}} \tag{3.2}$$

Bu denklemde;

T_0 : Toprağın başlangıç anındaki sıcaklığı (°C),
T : Çizgisel kaynaktan istenilen mesafedeki toprak sıcaklığı (°C) (boru çapına eşit uzaklık seçilirse borunun yüzey sıcaklığı bulunur),
Q' : Birim boy için aktarılan ısı miktarı (W/m),
k_t : Toprağın ısıl iletkenliği (W/m K),
r : Borunun merkezinden itibaren uzaklık (m),
α_t : Toprağın ısıl yayıcılığı = $\frac{k}{\rho_t C_P}$ (m^2/h),
ρ_t : Toprağın yoğunluğu (kg/m^3),
t : Başlangıçtan itibaren zaman (h),
β : İntegral değişkeni'dir.

X'in 0.2'den büyük değerleri için I(X) integralinin değerleri Ingersoll vd. (1954) tarafından tablo halinde çalışmalarında verilmiştir. X'in 0.2'den küçük değerlerinde integral terimi aşağıdaki gibi alınabilir.

$$I(X) = 2.303 \log_{10} \frac{1}{X} + \frac{X^2}{2} - \frac{X^4}{8} - 0.2886 \tag{3.3}$$

Geliştirdikleri denklemdeki integral teriminin, verilen zaman aralığında, ortalama ısı geçişi oranlarını dikkate alan iki parçaya ayrılmasını daha doğru olduğunu söylemiştir. İntegrasyon sınırları başlangıç ve bitişine karşılık gelen belirli zaman aralıklarında, integre edilen değerler tarafından belirlenir. Modelde temel varsayımlardan birisi ısı geçişinin sadece kaynak uzunluğuna dik yönde yani yarıçap doğrultusunda ve kaynağın sonsuz uzunlukta olmasıdır. Geliştirdikleri model sadece gerçek çizgisel kaynak için doğrudur. Fakat, birçok ısı pompasında kullanılan 50 mm'den daha küçük çaplı borular için önemsenilmeyecek kadar küçük bir hatayla kullanılabilir. Birkaç günden az zaman aralıklarında ve büyük çaplı borularda daha büyük hatalar oluşmaktadır. Hata terimi için baz alınacak oran, boyutsuz zaman/boru oranıdır. Bu değerin 20'den büyük değerlerinde bu modelin hata oranları kabul edilebilecek düzeydedir. Bu oran;

$$z = \frac{\alpha_t t}{r^2} \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmada, ısı iletim katsayısı yüksek olan ıslak kil ve orta seviyedeki nemli toprak üzerinde araştırmalar yapmış olup aynı zamanda kısa ve uzun borularda sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı geçişi oranları için de birçok hesaplamalar yapmıştır.

Bu yaklaşımın dezavantajı ise sadece ön hesaplamalarda kullanılabilecek basit bir yaklaşımdır. Yani, bazı genellemeler yapılmış fakat TID'si tasarımcılarını ilgilendiren ısı değiştirici uzunlukları, uzun veya kısa zamanlı çalışmanın toprak üzerindeki etkileri, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının etkisi, boruların birbirleriyle etkileşimi, toprak çeşitlerinin etkinlik katsayısı üzerindeki etkisi gibi konulara çok az değinmiştir.

Zamanın çok kısa ve boru çapının çok büyük olması durumlarında Çizgisel kaynak denklemi önemli hatalara sebep olmuştur. Carslaw ve Jaeger [9] bu problemi çözmek

için bir denklem geliştirmiştir. Bu denklemde, başlangıçtaki etkilenmemiş toprak sıcaklığı ile borunun çevresinde göz önüne alınan herhangi bir noktanın etkilenmiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı ΔT demiş ve aşağıdaki gibi ifade etmektedir. Bu integral R>10r olması durumunda güvenilir sonuçlar vermez.

$$\Delta T = \frac{Q'}{k_t} G(z, p) = \frac{2\pi rw}{k_t} G(z, p) \tag{3.5}$$

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta)} \left[J_0(p\beta).Y_1(\beta) - J_1(p\beta).Y_0(\beta) \right] \frac{d\beta}{\beta^2} \tag{3.6}$$

3.1.2 IGSHPA Yaklaşımı

Bose [10] modelinde Kelvin çizgisel kaynak teorisini kullanarak TID'sinin uzunluğunu yılın en sıcak ve en soğuk ayı için geliştirmiştir. Modelinde mevsimlik performansı ve sistem enerji tüketimini hesaplamıştır. Bu yaklaşımda tek bir düşey ve tek borulu bir ısı değiştiricisi için toprak direnci şöyle tanımlanmaktadır:

$$R_t = \frac{I(X_{r_d})}{2\pi k_t} \tag{3.7}$$

$$X_{r_d} = \frac{r_d}{2\sqrt{\alpha_t t}} \tag{3.8}$$

Bu denklemde;

$I(X_{r_d})$: Üssel integral,
r_d : Boru dış yarıçapı (m),
α_t : Toprağın yayıcılığı (m^2/h),
k_t : Toprağın ısıl iletkenliği (W/m K),
t : Zaman (h)'dır.

Üssel integral 0<X≤1 ve 1≤X≤∞ aralığında yaklaşık olarak verilmiştir. Buna göre,

⟹ 0<X≤1 için;

$$I(X) \approx \frac{1}{2}(-\ln X^2 - 0.57721566 + 0.99999193X^2 - 0.24991055X^4 + \cdots \quad \cdots$$

$$0.05519968X^6 - 0.00976004X^8) \tag{3.9}$$

⟹ 1≤X≤∞ için;

$$I(X)=\left[\frac{1}{2X^{2}e^{X^{2}}}\right]\frac{A}{B} \tag{3.10}$$

$$A=X^{8}+8.5733287X^{6}+18.059017X^{4}+8.637609X^{2}+0.2677737 \tag{3.11}$$

$$B=X^{8}+9.5733223X^{6}+25.6329561X^{4}+21.099653X^{2}+3.9684969 \tag{3.12}$$

Modelde birden çok düşey ısı değiştiricisini hesaplamak için birbirine yakın ısı değiştiricilerinin ısıl direnç etkilerini ve toprak direncinin toplam etkisini tek bir boru üzerine ekleyerek eşdeğer bir yarıçap formülü geliştirmiştir.

$$d_{eq}=\sqrt{n}(d_{d}) \tag{3.13}$$

Burada *n*, sondaj kuyusundaki toplam düşey boru sayısıdır. Tek bir U boru için n = 2'dir. Tek bir boru için ısı geçişine borunun gösterdiği direnç aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$R_{b}=\frac{1}{2\pi k_{b}}\ln\frac{r_{d}}{r_{i}} \tag{3.14}$$

Düşey bir U boru için boru direnci ise;

$$R_{b}=\frac{1}{2\pi k_{b}}\ln\frac{d_{eş}}{d_{eş}-(d_{d}-d_{i})} \tag{3.15}$$

Şeklindedir. Buradaki d_d boru dış çapı ve d_i ise boru iç çapını göstermektedir. Ek olarak bu çalışmada, yaklaşık ortalama toprak sıcaklığı, yıllık yüzey sıcaklığı salınımı ve faz sabitleri için tablo ve diyagramları da sağlamıştır.

Cane ve Forgas [11] çalışmalarında en düşük ve en yüksek akışkan giriş sıcaklık aralıklarını vermiş ve T_{min} ve T_{maks}'ın seçimine bağlı olarak toplam ısıtma ve soğutma kapasitesine ve ısıtma ve soğutmadaki etkinliğine göre ($COP_{ısıtma}$, $COP_{soğutma}$) bir ısı pompası seçilebileceğini söylemiştir. Isı değiştiricisi uzunluğunu belirlemek üzere aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

Isıtma için;

$$L_{ısıtma}=\frac{(Kapasite_{ısıtma})\left(\frac{COP_{ısıtma}-1}{COP_{ısıtma}}\right)(R_{b}+R_{t}ÇalışmaFaktörü_{ısıtma})}{T_{t_{\min,yıllık}}-T_{\min}} \tag{3.16}$$

Soğutma için;

$$L_{soğutma} = \frac{(Kapasite_{soğutma})\left(\frac{COP_{soğutma}-1}{COP_{soğutma}}\right)(R_b + R_t Çalışma Faktörü_{soğutma})}{T_{maks} - T_{t_{maks,yıllık}}} \quad (3.17)$$

3.1.3 Kavanaugh Yaklaşımı

Kavanaugh [12] çalışmasında silindirik kaynak çözümü kullanarak gömülü boru etrafındaki sıcaklık dağılımı ve ısı geçişini incelemiştir. Silindirik kaynak çözümünde de sabit yüzey sıcaklığı veya sabit ısı akısı kabulü kullanarak çözüme ulaşmaktadır.

Modelde sabit özelliklerdeki sonsuz bir katı ortam tarafından çevrelenmiş tek bir yalıtımlı boruyu da içerecek şekilde geliştirmiştir. Isı geçişi işleminin birbirleriyle mükemmel temas eden toprak ve boru ara yüzeyinde ve sadece iletimle gerçekleştiği varsayılmıştır. Yeraltı suyu hareketleri ve birbirine yakın kuyuların etkileşimleri ihmal edilmiştir.

Çalışmada birbirine yakın yerleştirilmiş yüzeylerdeki düzgün olmayan ısı akısı ve U-boru sayısı için bir düzeltme faktörleri olan C ve N kullanmış olup ve bu düzeltme faktörlerini de deneysel çalışmalar ve andırım sonucu belirlenmektedir.

$$\Delta T_b = \frac{Q'}{CN_i 2\pi r_d h_{eş}} \quad (3.18)$$

Bu denklemde;

N_i : U-boru sayısı,
C : Düzgün olmayan ısı akısı için düzeltme faktörü'dür.

N=2 için C=5 ve N=4 için C=0.6-0.7 değerlerini önermiştir. Daha sonra uzak alan sıcaklığı T_0'dan boru içine olan toplam sıcaklık düşüşünden ortalama su sıcaklığı bulunur. Ortalama su sıcaklığı;

$$T_{s,ort} = T_0 + \left[\frac{Q'}{k_t} G(z, p)\right] + \frac{Q'}{CN_i 2\pi r_d h_{eş}} \quad (3.19)$$

ifadesinden elde edilir. Tüm sistem üzerindeki enerji dengesi toplam su giriş çıkış sıcaklık farkını hesaplamamıza olanak vermektedir.

Tek bir U-boru'da yukarı su akışı olan boru parçası ile aşağı su akışı olan boru parçası arasında bir ısı geçişi meydana gelecektir. Çalışmada, tek kuyudaki iki kaynağın

etkileşiminin hesaplanmasına bir seçenek olarak kısa devre kayıplarını göz önüne alan tek çizgisel kaynaktan bahsetmektedir. Bu olayı düzeltmek için iki çözüm önermektedir.

Birincisi ortalama akışkan sıcaklığını kısa devre nedeniyle oluşan sıcaklık farkını hesaba katarak düzeltmektir.

$$\Delta T_{kd} = \frac{Q'_{kd} L}{m_s C_{p_s}} \tag{3.20}$$

Kısa devre ısı akısı Q'_{kd} aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q'_{kd} = \frac{T_{s,g} - T_{s,ç}}{2R_{kd}} \tag{3.21}$$

Buradaki R_{kd}, boru içindeki taşınım direnci, boru direnci ve toprak direncinin toplamı olan kısa devre direncidir.

İkinci çözümse kısa devre etkisi diferansiyel bir elemandan olan ısı geçişi denklemine uygulanmakta ve bu tüm ikili boru boyunca integre edilmektedir. Çözümde kısa devre etkisinin %10'dan daha az ve su sıcaklık farkının 8 °C'den az olduğu durumlarda kullanılabileceğini söylemiştir.

3.1.4 Hart ve Couvillion Yaklaşımı

Hart ve Couvillion [13] Kelvin'in çizgisel kaynak denklemini kullanarak çizgisel kaynakla toprak arasındaki zamana bağlı sürekli ısı geçişini ve çizgisel kaynak etrafındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Uzak bölge yarıçapı r_∞'u tanımlamak için çizgisel kaynak etrafındaki bölgede çizgisel kaynak tarafından atılan ısıyı içeren yaklaşık bir eşitlik elde etmişlerdir. Ancak, Kelvin çizgisel kaynak denklemi çizgisel kaynak çalıştırıldıktan sonra sonsuz olmayan tüm yarıçaplarda etrafındaki topraktaki sıcaklık dağılımını doğru vermediğini yani sadece $r_\infty = \infty$ doğru olduğunu söylemişlerdir. Önerdikleri uzak bölge yarıçap aşağıdaki gibidir:

$$r_\infty = 4\sqrt{\alpha_t t} \tag{3.22}$$

Çizgisel kaynak eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$T - T_0 = \frac{Q'}{4\pi k_t} \int_y^{\infty} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda} d\lambda \tag{3.23}$$

$$y = \frac{r^2}{4\alpha_t t} \tag{3.24}$$

Bu eşitlikteki integral terimi için çözüm integral tablolarından elde edilir ve

$$\left[y - \ln y - \gamma - \frac{y^2}{2(2!)} + \frac{y^3}{3(3!)} + ... + \frac{(-1)^{N+1} y^N}{N(N!)} \right] \tag{3.25}$$

'e eşittir.

Burada γ Euler sabitidir ve değeri γ ≈ 0.5772157'dir. Çizgisel kaynak tarafından çekilen veya atılan ısının etrafındaki toprak tarafından çekilen veya atılan ısıya eşit olması gerektiğini varsayarak ve integral terimi yerine çözümünü yazarak topraktaki sıcaklık dağılımı için aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir.

$$T - T_0 = \frac{Q'}{2\pi k_t} \left[\ln \frac{r_\infty}{r} - 0.9818 + \frac{4r^2}{2r_\infty^2} - \frac{1}{4(2!)} \left(\frac{4r^2}{r_\infty^2} \right)^2 + ... + \frac{(-1)^{N+1}}{2N(N!)} \left(\frac{4r^2}{r_\infty^2} \right)^N \right] \tag{3.26}$$

(3.26) eşitliğindeki r yarıçapı sıcaklığını bulmak istediğimiz noktanın çizgisel kaynaktan uzaklığıdır. Eğer r değeri borunun yarıçapına eşit alınırsa yaklaşık boru yüzey sıcaklığı elde edilir.

Çalışmada, Kelvin çizgisel kaynak teorisi temel alınarak eğer birden çok çizgisel kaynak olması durumunda kaynaklar arasında herhangi bir etkileşimin olmaması için r_∞'un kaynaklar arası mesafeden daha küçük olması gerekmektedir. Eğer r_∞, kaynaklar arası mesafeye eşit ve daha büyük olursa ısıl etkileşim olur ki bu da bindirme teknikleri kullanılarak çözülür.

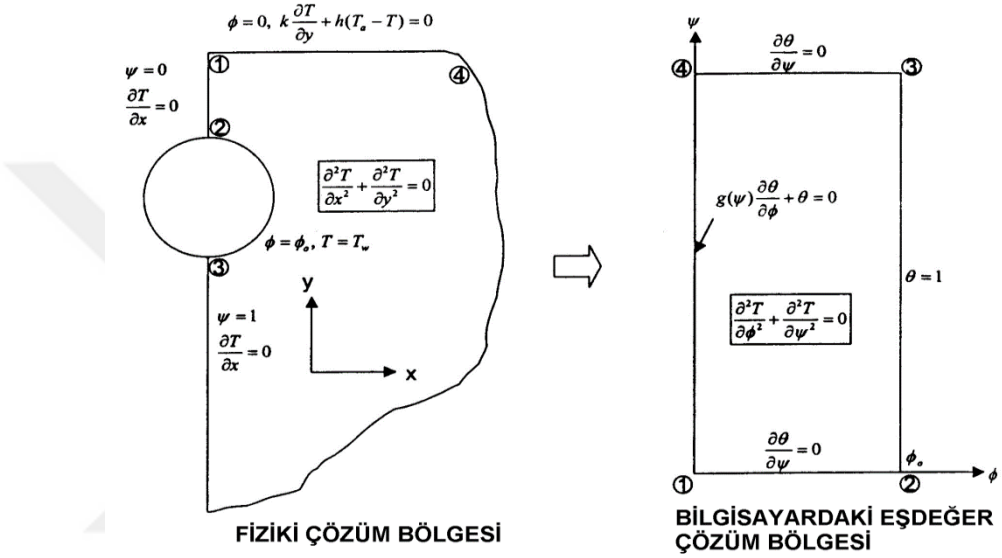
Boru etrafındaki sıcaklık dağılımı, kaynaktan herhangi bir yarıçap uzaklığındaki atılan veya çekilen ısının miktarı gibi sistem tasarım eşitlikleri ve çizgisel kaynak veya boru etrafındaki zamana bağlı ısı geçişini tanımlayan tüm eşitlikler bu uzak alan yarıçapı kavramı kullanılarak geliştirilmiştir.

Uzak alan yarıçapı kavramı kullanılarak çizgisel kaynak veya boru etrafındaki zamana bağlı ısı geçişini tanımlayan tüm eşitlikler ve boru etrafındaki sıcaklık dağılımı ve

kaynaktan herhangi bir yarıçap uzaklığındaki atılan veya çekilen ısının miktarı gibi sistem tasarım eşitlikleri elde edilmiştir.

3.1.5 Chung, Jung, Rangel Modeli

Üst yüzeyinden taşınımla olan ısı geçişi yarı sonsuz ortam içine gömülü ve sabit yüzey sıcaklığına sahip borudaki ısı geçişi problemi yarı analitik olarak çözülmüştür. Aşağıda yarı analitik çözümün denklemleri ve sınır koşulları görülmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları

Chung vd. [14] çalışmalarında kararlı hal koşullarında bazı kabuller yapmışlardır. Bunlar;

-Boru yüzeyindeki sıcaklığın değişmediği

-Toprağın derinliklerindeki sıcaklığın hava sıcaklığına eşit ve sabit olduğu

-Yüzeyde taşınım ısı geçiş katsayısının sabit olduğu

-Toprak özelliklerinin sabit olduğudur

Isı geçişi için kullanılan eşitlik Laplace denklemidir.

$$\nabla^2\theta = \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} = 0 \tag{3.27}$$

Burada θ boyutsuz sıcaklıktır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\theta = \frac{(T - T_h)}{(T_b - T_h)} \tag{3.28}$$

Bu denklemde;

T_h : Ortam akışkan sıcaklığı (°C),
T_b : Boru cidar sıcaklığı (°C)'dır.
Çalışmada yapılan kabuller gerçek hayattaki koşulları göstermemektedir.

3.1.6 Mukerji, Tagavi, Murphy Yaklaşımı

Mukerji vd. [15] çalışmalarında rasgele sarımlı gömülü borulardaki ısı geçişini kararlı hal koşulları için incelemiştir. Çizgisel kaynak modeli kullanılmış ve karmaşık geometrilerdeki boru dizilişlerine uygulamışlardır. Geliştirilen model toprağın altına gömülen düz yatay borular için yapılan deneysel çalışmayla karşılaştırılmıştır. x ve y eksenlerinde sonsuz ve z ekseninde yarı sonsuz bir ortam söz konusu olduğunda z=0 toprak yüzeyi olması durumunda g_o kaynaktaki sabit ısı üretimi olmak üzere noktasal bir kaynak etrafındaki sıcaklık dağılımı aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$T(x,y,z) = T_t + \left(\frac{g_o}{4\pi k_t}\right)\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)\right] \tag{3.29}$$

Bu denklemde;

$$r_1 \equiv r_1(x,y,z) = \sqrt{\left(x-x_0\right)^2 + \left(y-y_0\right)^2 + \left(z-z_0\right)^2} \tag{3.30}$$

ve

$$r_2 \equiv r_2(x,y,z) = \sqrt{\left(x-x_0\right)^2 + \left(y-y_0\right)^2 + \left(z+z_0\right)^2} \tag{3.31}$$

şeklinde ifade edilir. Spiral sarımlı bir çizgisel kaynak etrafındaki sıcaklık dağılımı ise yukarıdaki denklemler spiral kaynak boyunca integral alınırsa,

$$T(x,y,z) - T_t = \frac{q'}{4\pi k_t}\left(\int_0^{n(2\pi)} \frac{s\,d\omega}{r_1} - \int_0^{n(2\pi)} \frac{s\,d\omega}{r_2}\right) \tag{3.32}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada n, tüm döngüdeki spiral sarım sayısıdır.

Çizgisel kaynak modeli kullanılarak düz boru için bulunan ifadeler ve sonuçlar mevcut yayınlardaki deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğunu söylemişlerdir.

Spiral sarımlı borularda ısıl etkileşim çok fazla olduğu söylenmiş ve Hesaplamada kullanılan ana tasarım değerlerine göre spiral boruda birim uzunluktaki ısı akısı düz borunun sadece %25'i kadar olduğu görülmüştür.

3.2 Sayısal Modeller

Analitik model yaklaşımlarında kullanılan çizgisel kaynak veya silindirik kaynak yöntemleri boru ile toprak ara yüzeyindeki direnci ve yakın borular arası ısıl etkileşimi hesaba katmadığından bu yöntemler üzerinde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Sayısal yöntemler analitik yöntemlere göre daha karmaşık geometrileri, uzun süreler için ve değişken sınır koşullarının daha kolay uygulanmasından dolayı avantajlı olduğu söylenebilir.

3.2.1 Hellstrom Modeli

Hellstrom [16-17]'un modeli birçok kuyudan oluşan toprak yapısını iki bölgeye ayırmaktadır. Tek bir kuyuyu çevreleyen hemen yakınındaki bölgeyi "yerel bölge" olarak tanımlamaktadır. Verilen bir zamanda kuyu içinde ortalama akışkan sıcaklığı ile yerel ortalama sıcaklık arasındaki fark zamana bağlı akışkan-toprak direnci nedeniyle ısı çekme/aktarma oranı ile orantılıdır. Bu her bir kuyuda kısa zamanlı ısıl değişimlerden dolayı oluşan ısı geçişini hesaplayabilmekte ancak uzun zaman aralıklarında bu bölgedeki ısı akış alanı zamanla değişim göstermemektedir. İkinci bölge ise birçok kuyudan oluşan ısı deposu ile uzak bölge arasındaki ısı iletim problemiyle ilgilidir. Hellstrom bunu "küresel" problem olarak tanımlamaktadır. Çalışmada, küresel ve bölgesel problemler için sayısal yöntemleri kullanan ve bunları kararlı akış bölümünde analitik sonuca uygulayan melez bir modeldir. Sayısal model küresel problem için radyal-eksenel koordinat sisteminde açık sonlu fark yöntemini kullanmaktadır. Bölgesel çözüm için tek boyutlu radyal bir ağ depolama bölgesini farklı alt bölgelere ayırmakta kullanılmıştır.

3.2.2 Thornton vd.'nin Hellstrom Modeli Uygulaması

Thornton vd. [18] çalışmasında Hellstrom modelini kullanarak bir TRNSYS adlı yazılım programında uygulamıştır. Değişiklikler yapılan bu yazılım programının giriş suyu sıcaklıklarını doğru bir şekilde tahmin ettiği ifade edilmektedir.

3.2.3 Eskilson Modeli

Eskilson [19]'nun modeli boyutsuz sıcaklık tepki faktörlerine yani g-fonksiyonuyla ilgilidir. Modelde kuyu direnci ayrı bir hesap olarak eklenmiştir. Eskilson, yaklaşımında toprağın ısı akısına tepkisini uzun zamanlı olarak çözmek için dizayn etmiştir. Ancak, modelin dezavantajı, kısa zaman tepkilerini doğru hesaplayamamış ve g-fonksiyonlarını sağlayan sayısal modelde kuyu geometrisi dikkate alınmamıştır.

3.2.4 Rottmayer, Beckman ve Mitchell Modeli

Rottmayer vd. [20] çalışmasında U boru ısı değiştiricileri için açık sonlu fark yöntemini kullanarak bir model geliştirmiştir. Kuyunun her bir 3 m düşey kesitindeki yanal ısı geçişini hesaplamak üzere kutupsal bir ızgara üzerinde iki boyutlu sonlu fark formülasyonu uygulanmıştır. Düşey yöndeki iletim ihmal edilmiş fakat modelin her bir kesiti U boru boyunca akış modeli sınır koşulları kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Bu şekilde derinlikle oluşan sıcaklık farklarını da hesaba katan sanki üç boyutlu model elde edilmiştir. Dairesel U boru ısı değiştirici boruları pasta dilimi şeklindeki ve çevresi gerçek dairesel borununkine eşit dairesel olamayan borular kullanılarak modellenmiştir.

3.2.5 Mei ve Emerson Modeli

Mei ve Emerson [21] çalışmalarında borudan radyal yönde ısı geçişi, donmuş toprak bölgesi ve uzak bölgeyi tanımlayan üç adet tek boyutlu kısmı diferansiyel denklemin çözümünü açık sonlu fark yöntemini kullanarak yapmışlardır. Model, donmuş bölge ve boru cidarı için farklı zaman adımları, akışkan ve donmamış toprak bölgesi için ise daha büyük zaman adımları kullanmaktadır. Çalışmada 48 günlük bir zamanı deneysel verilerle karşılaştırmıştır.

3.2.6 Shonder ve Beck Modeli

Shonder ve Beck [22] çalışmalarında U boru ısı değiştiricisinde boruların ve ısı taşıyıcı akışkanın kapasitesini hesaplamak için, eşdeğer çaptaki etkin tek boru çevresinde sonlu kalınlıkta bir ince film tabakası olduğunu düşünerek bir model geliştirmişlerdir. Tek boyutlu geçici rejimde ısı iletimini düşünerek dolgu ve etrafındaki toprak yapısı boyunca

bir kuyu modeli film tabakası yaklaşımını yapmışlardır. Film tabakasının iç yüzeyinde zamanla değişen ısı akısı ve uzak radyal sınır ise bozulmamış sabit bir uzak bölge sıcaklığı kabulü yapmışlardır. Modelin çözümünde Crank-Nicolson çözüm yöntemi ve sonlu fark formülasyonu kullanılmıştır.

3.2.7 Muraya Modeli

Muraya vd. [23] çalışmalarında uzak alan ve döngü sıcaklıkları, gövde boşluğu, toprak yapısı ve özellikleri ve ısı dağıtım oranına bağlı ısı değiştiricisi etkinliğini tanımlamış ve bu etkileşimin miktarının hesaplamasını incelemiştir. Model, U borular arasındaki ısıl etkileşimi belirlemek için geçici rejimde iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanmıştır. Çalışmalar sonucunda, kuyu geometrisine bağlı olan toplam ısıl etkinlik ve dolgu etkinliği tanımlamışlardır.

3.2.8 Piechowski Modeli

Piechowski [1] çalışmasında yatay borulu TID'lerinde ısı ve kütle geçişini incelemiştir. Topraktaki ısı ve kütle geçişi mekanizmasının tüm hatlarıyla incelenmesi ve modellenmesi çok karmaşık ve zordur. Temelde ısı ve kütle geçişinde odaklanılan yer boru ve civarındaki bölgedir. Modelde bazı kabuller yapılmıştır:

- Topraktaki ısı geçişi eksenel olarak simetriktir,
- Topraktaki boruya paralel yöndeki ısı geçiş ihmal edilebilir,
- Toprak homojendir ve boru boyunca özellikleri değişmemektedir,
- Borunun herhangi bir kesitinde akışkan hızı ve sıcaklığı sabittir,
- Doymamış toprakta yerçekiminin kütle geçişine etkisi yoktur,
- Borudan belirli bir uzaklıktaki toprak sıcaklığı sadece mevsimsel olarak değişmekte ve ısı pompası çalışma şartlarından etkilenmemektedir,
- Birden fazla ısı değiştiricisi kullanıldığında bunlar arasındaki mesafe birbirlerini etkilemeyecek kadar büyüktür,
- Toprak ile havanın birleştiği ara yüzeydeki sınır koşulu taşınım tipi sınır koşuludur.

Model üç temel eşitlik dengesi üzerine kurulmuş olup, bunlar ısı taşıyıcı için enerji dengesi, ısı ve kütle geçişidir. Bunların denklemi sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$-\nu \frac{\partial T_a}{\partial l} + \frac{2U_i}{r_{b,d}\rho_a c_a} \frac{\partial T_b}{\partial r}\bigg|_{r_{b,d}} = \frac{\partial T_a}{\partial t} \tag{3.33}$$

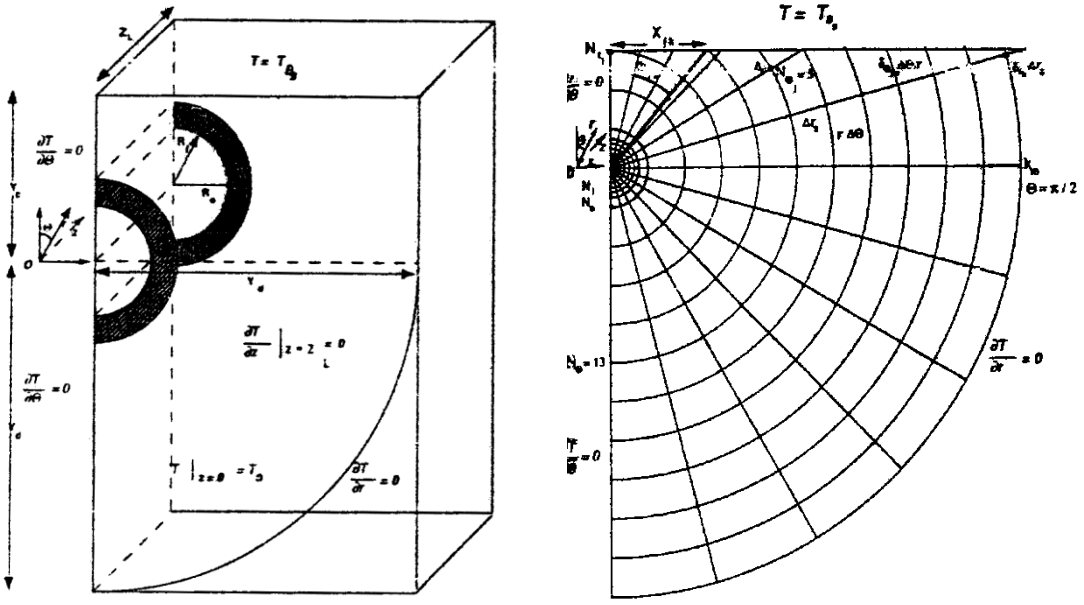
$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) + \nabla(D_\varepsilon \nabla \theta_l) + L_\varepsilon \rho_l \frac{\partial K_h}{\partial y} \tag{3.34}$$

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla \theta_l) + \nabla(D_T \nabla T) + \frac{\partial K_h}{\partial y} \tag{3.35}$$

Toprak ve havanın birleştiği ara yüzeyde sınır koşulu taşınım olduğundan dolayı analitik olarak çözmek mümkün değildir. Bundan dolayı ısı ve kütle geçişi ifadelerini beraber çözmek için sonlu fark yönteminden yararlanılmış ve çözümde kapalı ve açık yöntemler kullanılmıştır.

3.2.9 Negiz, Hastaoğlu, Heidemann Modeli

Negiz vd. [24-25] çalışmalarında üç boyutlu ve zamana bağlı olarak silindirik koordinatlarda toprağa gömülü bir boru içerisindeki akışkandan olan ısı geçişini incelemiş ve çözümünde ADI (Değişken Yön Kapalı) yöntemi kullanılarak sonlu farklar yaklaşımıyla çözmüşlerdir. Çözümün doğruluğuna bakmak için sayısal model analitik bir modelle karşılaştırılmıştır. Modelde, toprak üst yüzeyinin sabit sıcaklıkta tutulduğu ve sıcaklığı gömülü borudan ve topraktan daha düşük olduğu ve boru içerisindeki akışın laminer olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 3.2 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları

Sistem geometrisinden dolayı karmaşık olduğundan analitik çözüm olmayacağından sayısal çözümde sonlu fark eşitlikleri silindirik koordinatlarda yeni bir biçimde tasarlanan ızgara yapısı ile şekillendirilmiştir. En uygun ızgara yapısının seçilmesi için parametrelerin çözüm üzerindeki etkileri incelenip ve zaman aralığı seçilerek çözüm yapılmıştır. Modeldeki ızgara yapısı yukarıda görüldüğü gibidir.

Boru çapı büyük, gömme derinliği küçük (andırım süresini kısa tutmak için yapılmıştır) olan çelik boru için örnek bir çalışma alınıp çözüm yapılmıştır. Sayısal çözüm sonucunda 3 ortam için yani boru içindeki akışkanda, boru cidarında ve topraktaki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

3.2.10 Chiasson, Spitler, Rees, Smith Modeli

Chiasson vd. [26-27-28] çalışmalarında TKIP kullanarak kaldırımların ısıtılması durumundaki ısı geçişini incelemişlerdir. Burada kaldırımları ısıtmakta kullanılan sistem, ısı pompası TID'sine yardımcı olduğunu ve bu da sistemin ilk yatırım giderleri azalttığını ifade etmişlerdir.

Modelde, spiral ve sarmal olmak üzere iki farklı şekilli ısıtma sistemi kullanılmıştır. Çalışmada, kaldırım taşındaki geçici rejimde ısı geçişi iki boyutlu olarak incelenmiş ve kesit olarak taşın orta kısmından ve akış yönünde bir kesit dikkate alınmış ve bu da tekrarlayan bir geometri sağladığını ifade etmişlerdir.

Üst yüzeydeki ısı akısı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\dot{q}_{(m,l)} = \dot{q}_{güneş} + \dot{q}_{uzunda\,lga} + \dot{q}_{taşınım} + \dot{q}_{yağmur,kar-duyulur} + \dot{q}_{yağmur,kar-gizli} \qquad (3.36)$$

Burada;

$\dot{q}_{güneş}$: Yüzeye gelen güneş ışınımı (W/m^2),

$\dot{q}_{uzunda\,lga}$: Uzun dalga yayılan ışınım (W/m^2),

$\dot{q}_{taşınım}$: Yüzeyde taşınımla olan ısı akısı (W/m^2),

$\dot{q}_{yağmur,kar-duyulur}$: Yağan yağmur ve karla gelen duyulur ısı (W/m^2),

$\dot{q}_{yağmur,kar-gizli}$: Eriyen kar ve yoğuşan / buharlaşan su nedeniyle oluşan gizli ısı (W/m^2)'dır.

Toprak hacmi alındığında alt yüzeyi adyabatik olarak kabul edilebileceği ancak köprü ve benzeri açıkta olduğu zaman uzun dalga ışınımı ve taşınım etkileri de dikkate alınmalıdır. Burada yüzeye gelen güneş ışınımı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$\dot{q}_{güneş} = \alpha I \tag{3.37}$$

Burada;

α : Yüzeyin yutuculuğu,
I : Toplam yaygın ışınım (W/m^2)'dır.

Uzun dalga ışınım ısı akısı ise kaldırım üst yüzeyinden ve geçitlerde alt ve üst yüzeylerinden gerçekleşen ısı akısıdır. Bu modelde doğrusal ışınım katsayısı h_r kullanılmaktadır.

$$h_r = 4\varepsilon\sigma\left(\frac{T_{(m,n)} - T_2}{2}\right)^3 \tag{3.38}$$

Burada;

ε : Yüzeyin yayıcılığı,
σ : Stefan-Boltzman sabiti,
$T_{(m,n)}$: Yüzeydeki düğüm noktası sıcaklığı (K),
T_2 : Gökyüzü sıcaklığı veya alt yüzey açıkta ise toprak sıcaklığı (K)'dır.

Her bir düğüm noktasındaki uzun dalga ışınım ısı akısı bileşeni şu şekilde verilmiştir;

$$\dot{q}_{uzunda\lg a} = h_r(T_2 - T_{(m,n)}) \tag{3.39}$$

Üst veya alt yüzeydeki taşımın rüzgâr hızına bağlı olarak doğal veya zorlanmış taşınım şeklinde ele alınmıştır. Kaldırım yüzeyindeki her bir düğüm noktasındaki taşınım ısı akısı ise şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\dot{q}_{taşınım} = h_c(T_{kt} - T_{(m,n)}) \tag{3.40}$$

Burada;

h_c : Taşınım ısı geçiş katsayısı (W/m^2 K),
T_{kt} : Kuru termometre sıcaklığı (^{o}C)'dır.

Yağış nedeniyle olan ısı geçişi duyulur ve gizli ısı geçişi olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Bu model kaldırım yüzeyindeki ısı ve kütle geçişi için basit kütle ve

enerji dengesini kullanmıştır. Yağan yağmur veya kar nedeniyle kaldırım yüzeyindeki her bir düğüm noktasındaki duyulur ısı akısı aşağıdaki eşitlikle verilmektedir;

$$\dot{q}_{yağış} = \dot{m}_{yağış} C_p (T_{kt} - T_{(m,1)}) \quad (3.41)$$

Burada;

$\dot{m}_{yağış}$: Birim zamanda birim alana düşen yağış miktarı, su eşdeğeri (kg/s),

C_p : Hava sıcaklığındaki suyun özgül ısısı (J/kg K)'dır.

Kaldırım yüzeyinden buharlaşma yoluyla oluşan ısı akısı;

$$\dot{q}_{yağış} = \dot{m}_s h_{sb} \quad (3.42)$$

ile ifade edilmiştir.

Bu denklemde;

$\dot{m}_s$: Birim zamanda birim alandan buharlaşan su miktarı (kg/s),

h_{sb} : Suyun buharlaşma gizli ısısı (J/kg)'dır.

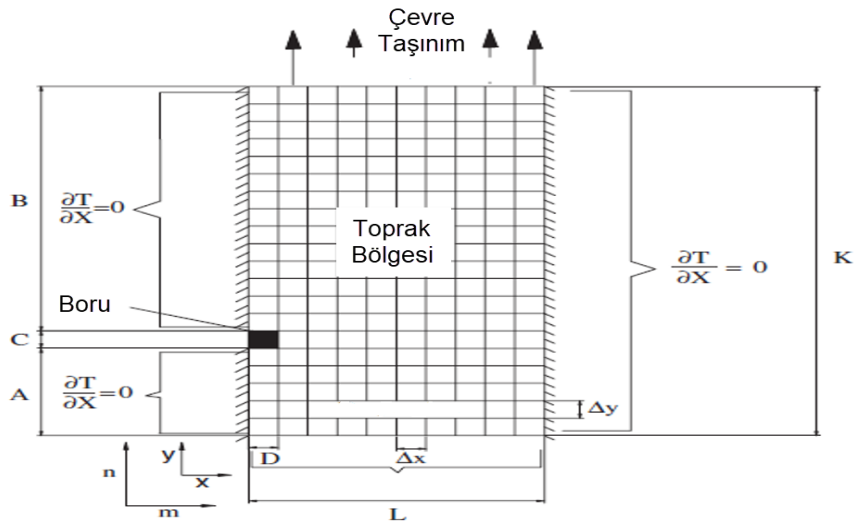
Çalışmada su giriş sıcaklıkları, hızı ve meteorolojik verileri girdi olarak verip ölçülen ve hesaplanan su dönüş sıcaklıklarını karşılaştırmıştır. Model,36 günlük zaman periyodunda ölçülen ve hesaplanan birikmiş ısı dağıtımı arasındaki fark % 4.71 olduğunu ifade etmişlerdir. Modelin uygulanabilirliğini göstermek adına TRNSYS bilgisayarlı andırım ortamında da tasarlanmış ve tasarlanan TID'si boyutlarını ve gerekli kuyu sayısını azalttıklarını ifade etmişlerdir.

3.3 Son Yıllarda Geliştirilen Sayısal Modeller

H. Esen vd. [29] 2 farklı derinliğe gömülen yatay TID'nin ısıtma sezonu için TKIP'inda enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 3.3). 2 m derinlikte olan yatay TID'nin 1 m derinlikte olana göre ekserji yıkımı %2 daha az olduğunu ve referans çevre sıcaklığın artmasıyla her iki yatay TID'ninde ekserji verimliliğinin azaldığını ortaya koymuşlardır.

H. Esen vd. [30] çalışmalarında Fırat üniversitesinde toprak altına gömdükleri borularla, bir TKIP kurup performansı üzerine analiz yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmanın yanında sonlu fark yöntemi kullanarak numerik çalışmalarla doğrulama yapmışlardır.

Topraktaki ısı transferi için olan numerik modelde, boru civarında sıcaklık dağılımını belirlemişlerdir.



Şekil 3.3 Çözüm algoritmasının görünümü

Y. Nam vd. [31] çalışmalarında belirli bir şekli olan ısı değiştirici modeli ile yeraltı su akışıyla ısı taşınım modelini birleştirerek numerik bir model oluşturmuşlardır. Geliştirilen yeni model kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları ve toprak fiziksel özelliği değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve modelin validasyonunu yapmışlardır. Bu simülasyon sonuçlarını Tokyo'da bir ofis binasına uygulamışlardır. Deneysel ve numerik çalışmaların uyumluluk noktasında çok iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

S. Sanaye vd. [32] çalışmalarında yatay olarak toprağa yerleştirilen TKIP'nın optimum tasarımını gerçekleştirmek için ısıl ve ekonomik simülasyonu yapmışlardır. Visual Basic 6 programıyla 2 optimizasyon metodu uygulanarak (genetic algorithm and Nelder–Mead) optimizasyon sonuçlarının doğrulanması yapılmıştır. Isıtma ve soğutma yükleri, çeşitli iklim durumları, ısı pompası tasarım parametrelerinin optimum değerleri (kondenser ve evaporatörde doymuş sıcaklık ve basınç) aynı şekilde toprak altında ısı değiştiricisine giriş ve çıkış sıcaklıkları, boruların çapı ve konfigürasyonu ve TKIP'nın uzunluğunu incelemiş ve optimize etmişlerdir. Bu parametreleri inceleyip bir amaç fonksiyonu tanımlayarak TKIP için ekonomik analizi de yapmışlardır.

A. Rezaei vd. [33] tarafından TKIP'nın homojen olmayan bir çözüm alanında çalışabilmesi için bir model oluşturmuşlardır. Kış koşulları altında yalıtkan olarak araba lastiği bileşenleri (Tire Derived Aggregate) kullanılarak sayısal çalışma yapılmıştır. **H.**

Demir vd. [34]'nın yapmış olduğu deneysel çalışmalar kullanılarak geliştirilen model doğrulanmıştır. Araba lastiği bileşenleri (Tire Derived Aggregate) kullanılmasıyla topraktan absorbe edilen enerji oranın % 17 arttığı ve ılıman şartlara nazaran soğuk şartlarda daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

G. Florides vd. [35] çalışmalarında dikey ve yatay TID'sinin matematiksel modellemesini yaparak verimliliklerini karşılaştırmışlardır. Dikey 2 tane 100 metrelik U boru ve yatay 4 tane 50 metrelik boru kullanılarak temmuz ayında Güney Kıbrıs'ta ölçümler yapılmış ve U borunun simülasyon sonuçları ölçülen sonuçlarla oldukça iyi benzeşme gösterdiğini söylemişlerdir. FlexPDE programında matematiksel modeli çözülerek deneysel verilerle doğrulama yapılmıştır. Gerçek sıcaklık gradyenin ve verimliliğin soğutma sezonunda dikey boruda yatay boruya göre daha iyi sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir.

M. Cimmino vd. [36] çalışmalarında Eskilson'nun geliştirmiş olduğu g-fonksiyon konseptini kullanarak sondaj alanının termal davranışının nasıl olduğunu incelemiştir. G-fonksiyonuna yaklaştırmak için önerdikleri yeni modelde sondaj kuyuları arasında ısıl etkileşimden dolayı sondaj kuyuları arasında ısı aktarımındaki değişimi ve sondaj derinliğinin sondaj kuyusu yüksekliğine oranının (D/H) değişimini incelemişlerdir. Geliştirmiş oldukları yeni modelde analitik sonlu çizgi kaynağı kullanılmış ve büyük bir sondaj alanının g-fonksiyonunu bu yöntemle hesaplamışlardır. Gömme derinliğinin etkisinin kısa sondaj kuyularında önemli bir parametre olduğunu söylemişlerdir.

L. Lamarche [37] çalışmasında TID'sinin tasarımı ve simülasyonu için çeşitli metotlar kullanmıştır. Sonsuz çizgi kaynak ve sonsuz silindirik kaynak çözümlerini kullanmış ve küçük Fourier sayılarında sonsuz silindirik kaynak çözümünün daha doğru sonuçlar verdiğini söylemiştir. Klasik çözümlerin kısa vadeli davranışlarını tekrar gözden geçirmiş ve genellikle Fourier sayısı normal durumda kuyu yarıçapına bağlı ise literatürde kabul edilenden daha farklı sonuçlar elde ettiğini söylemiştir. Bu farklılıkların nedenlerini incelemiş ve bazı seçenekler önerilmiştir.

S. Wang [38] çalışmasında Amerika'nın 3 iklim bölgesi için EnergyPlus simülasyon programında TKIP ile değişken soğutucu debili sistemi (VRF), yıllık enerji tüketimi ve enerjinin en yoğun gereksinimi olduğu durumlar için karşılaştırmıştır. EnergyPlus simülasyon sonuçlarına göre TKIP değişken soğutucu debili sisteme (VRF) göre daha çok

enerji kazanımı ve enerjinin pik yüklerinde önemli bir azalma sağladığını ortaya koymuştur. HVAC teknolojisinde TKIP kullanımı yıllık enerji kazanımı, pik yüklerde azalma ve termal konfor arttırmak açısında önemli olduğunu söylemiştir.

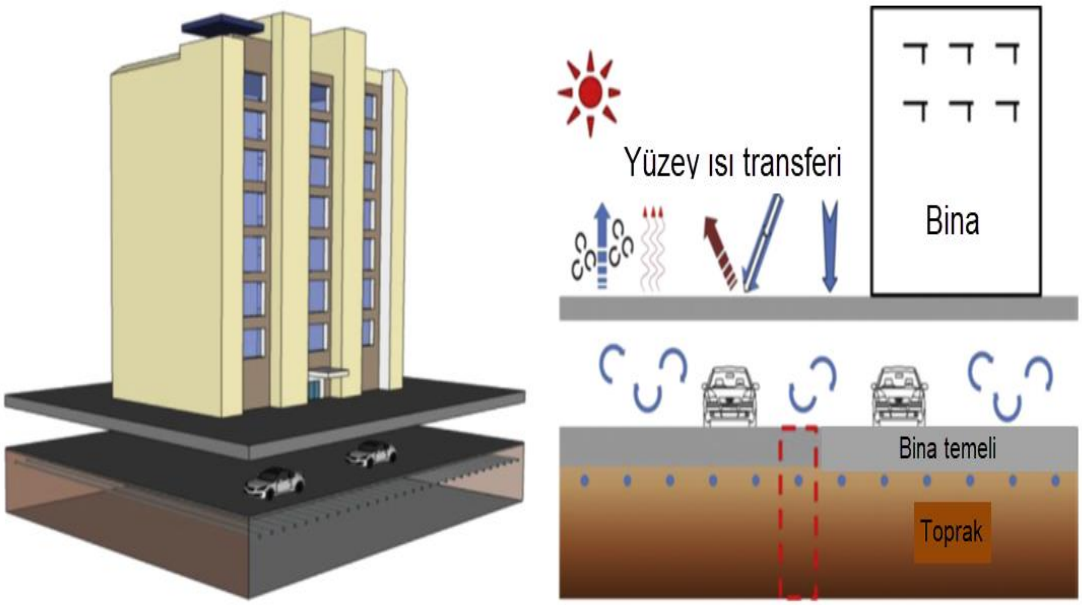
Y. Li vd. [39] çalışmalarında dikey olarak yerleştirilen sondaj ısı değiştiricisinde boru içerisindeki akışkanın aşağıya ve yukarıya doğru hareketindeki sıcaklık farklılığından dolayı oluşan ısıl kısa devre durumunu 2 boyutlu olarak incelemişlerdir. 3 boyutlu dikdörtgen bir model geliştirerek boru boyunca akışkan sıcaklığını araştırmışlar ve akışkan çıkış sıcaklığı, birim boyda ortalama ısı akısı ve kısa devre kayıplarının akışkan hızına, sondaj derinliğine ve harç ısı iletkenliğine nasıl etki ettiğini gözlemlemişlerdir.

H. Qian vd. [40] çalışmalarında TKIP'nın COP'si ve toprak sıcaklık dağılımını hesaplamak için yeni bir model ortaya koymuşlardır. Sondajlar arası mesafe, günlük çalışma modu ve sezonsal ısı alınması ve verilmesi gibi farklı senaryolar geliştirerek, bu simülasyon çalışmalarının TKIP'nın performansını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sonuçlarına göre eğer ki sondajlar arası mesafe az ve büyük ısıtma ve soğutma yükü olursa toprak sıcaklığı etkilenecek ve hava-kaynaklı ısı pompasının COP 'sinden daha az bir değer elde edileceğini ileri sürmüşlerdir. Uzun sondaj mesafesi, yeterli genişlikte sondaj aralığı olursa ve kesikli çalışma olursa TKIP'nin performansı artacağını ancak ilk yatırım maliyetinin de fazla olduğunu söylemişlerdir.

F. Robert vd. [41] çalışmalarında dikey TID'si ve ısı pompası sisteminin projenin toplam maliyetini minimize etmek için yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. TID'sinde ilk yatırım maliyeti olan sondaj, kazı, ısı pompası ve borulama maliyetlerinin yanında çalışma maliyeti olarak binanın ısıtma/soğutma için enerji maliyetini dikkate alarak uygun sondaj sayısı ve derinliği, borular arası mesafe ve optimum ısı pompası boyutlarını incelemişlerdir. Geliştirilen metod farklı ısı yükü ihtiyacı ve farklı toprak iletkenliğinde test edilmiştir. Sondaj sayısı ve derinliğin maliyet duyarlılık analizinde en önemli parametre olduğunu göstermiştir.

Y. Nam vd. [42] çalışmalarında yatay ısı değiştiricileri kullanarak enerji temeline yerleştirilen sistemi optimize etmek için toprak ısı aktarma oranının (HER) tahminini numerik simülasyon modeliyle geliştirmişlerdir. Geliştirilen model 3 ana başlıkta incelenmiş olup; toprak ısı transfer modeli, toprak yüzey ısı modeli ve Toprak ısı

değiştirici modelleridir. Farklı dizayn ve kurulum şartlarına göre oluşturulan örnek simülasyon çalışmaları için ısı aktarma oranları (HER) bulunmuştur.



Şekil 3.4 Simulasyon çalışma modelinin görünümü

Örnek simülasyon çalışmalarında çeşitli parametreler (borular arası mesafe, boru çapı, derinlik, devir suyu sıcaklığı, debi ve çalışma durumları)dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Isı aktarma oranı (HER) her simülasyon için uzun periyotta yapılmış ve en iyi sonucu 32A çaplı, 0.3 m borular arası mesafe, toprak ile temel arasına kurulan ve debi 9.52 L/dk olan simülasyon için ortalama HER değeri 14 W/m olarak bulmuşlardır (Şekil 3.4).

T. Sivasakthivel vd. [43] çalışmalarında TID'sinde 8 önemli parametreyi (U boru çapı, sondaj çapı, ısınma yükü, beton ve boru iletim katsayıları, su giriş sıcaklığı, U borular arasındaki mesafe ve kütlesel debi) optimize etmek için Taguchi ve Utility metotlarını uygulamışlardır. TID'sinin uzunluğu, COP ve TID'nin ısıl direncini amaç fonksiyonu olarak düşünmüşlerdir. Taguchi optimizasyonu sonucunda TID'sinin uzunluğunda %15.17 azalma, COP değerinde %2.5 artma ve TID'sinin ısıl direncinde %17.1 azalma olduğu görülmüştür.

H. Cho vd. [44] çalışmalarında TKIP'nın performansı ve TID'sinin boyutunun nasıl belirleneceğiyle ilgili konuda araştırmalar yapmışlardır. TID uzunluğunun kapasiteye oranının (L/Q), ısıtma ve soğutma sezonu için ısı iletim katsayısı, sondaj aralığı ve sondaj

ısı transfer direnci, giriş suyu sıcaklığı ve U-boru mesafesine göre değişimini incelemişlerdir. TKIP tasarlanırken TID'sinin boyutu maliyet açısından önemli bir parametre olduğu ve optimum bir tasarım yapılırken TID'sinin boyutu ve TKIP'nın performansı beraber düşünülmesi gerektiğini söylemişlerdir.

W. Yang vd. [45] TKIP için kış şartlarında en önemli sorunlardan biri olan TID çevresindeki toprağın donmasıyla ilgili sayısal çalışma yapmışlardır. Bunun için 24 saatlik çalışma içerisinde meydana gelen faz değişimlerini dikkate alan iki boyutlu bir ısı transfer modeli geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda toprağın bulundurduğu su miktarını artırmanın toprağın soğuma hızıyla ilişkili olduğu ve artırıldığında toprağın daha yavaş soğuduğu belirlenmiştir. Ayrıca toprağın soğuma karakteristiğinin çoğunlukla toprağın termal difüzyonuna bağlı olduğu tespit edilmiştir.

K. Kupiec vd. [46] çalışmalarında yatay TID'leriyle ilgili matematiksel bir model oluşturmuşlar ve literatürde bulunan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmışlardır. Bu çalışmanın sonunda yatay TKIP'nın tipik çalışma şartları altında 10 yıllık çalışma periyodu sonunda toprak sıcaklığının döngüsel kararlı duruma geçeceği tespit edilmiştir.

M. Bojic vd. [47] çalışmalarında farklı ısı kaynaklarıyla çalışan farklı radyant ısıtma panellerinin performanslarını incelemişlerdir. 4 farklı radyant ısıtma paneli olan zeminden, duvardan, tavandan ve yeni geliştirdikleri zemin-tavan radyant panellerinin kullanımını 3 farklı ısı kaynağı olan doğalgaz kazanı, TKIP, fotovoltayik ve TKIP'nin beraber olduğu durumlar için analizini yapmış ve bunlara ait toplam enerji tüketimi, toplam CO_2 emisyonu ve toplam ısıtma maliyetine göre karşılaştırılmıştır. Yeni geliştirilmiş olan zemin-tavan radyant ısıtma sisteminin performans açısından en iyi, tavan ısıtmanın ise en kötü olduğunu ortaya koymuşlardır.

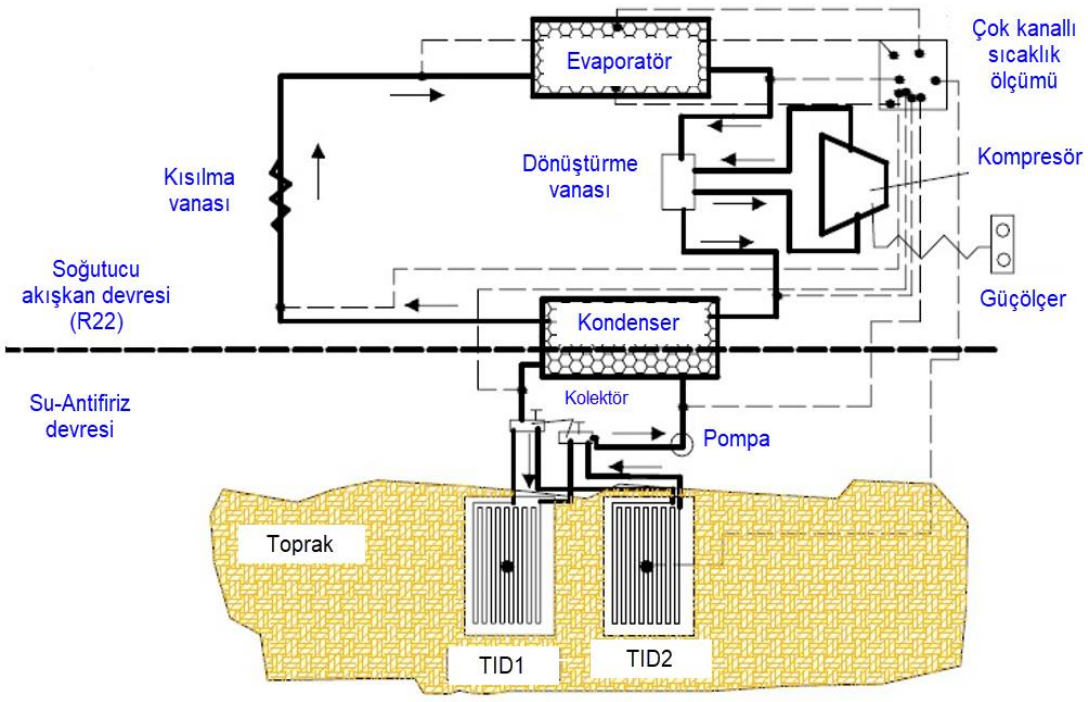
H. Nowamooz vd. [48] çalışmalarında doymamış toprak tabakalarında zamana ve derinliğe göre değişen ısıl yayılım katsayısının sonlu farklar yöntemini kullanarak ısı dağılımının nasıl gerçekleştiğini incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak toprağın hidrotermal özellikleri olan su içeriği, kuruluk yoğunluğu ve kum içeriği verilmiş ve bazı teorik yaklaşımlar kullanılarak toprağın her tabakasında ısı yayılım ve ısı iletim katsayılarını belirlemişlerdir. Zamana göre belirlenen sıcaklık, deneysel olarak ölçülerek numerik modelle karşılaştırılmış ve oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Homojen ve homojen

olmayan farklı toprak yapılarının ortalama ısıl yayılım katsayısı değeri için yaklaşık aynı ısıl özellik gösterdiğini söylemişlerdir.

3.4 Son Yıllarda Geliştirilen Deneysel Çalışmalar

A. Hepbasli vd. [49] çalışmalarında Ege Üniversitesinde 50 m uzunluğunda U-boru, dikey olarak toprağa yerleştirilmiştir. Ege üniversitesinde güneş enerji enstitüsünde 60 m^2 lik bir test odasının ısıtma ve soğutmaları sırasıyla 3.8 kW ve 4.2 kW olan durumlar için analiz etmişlerdir. Sistemde derinliğe göre toprağa bırakılan ısı akısını ortalama 11 W/m bulmuşlardır.

M. Inallı vd. [50] çalışmalarında Elâzığ'da 16 m^2'lik bir odayı ısıtmak için farklı derinliklere yerleştirilen TID'lerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda farklı derinliklerdeki yatay TID'lerinin ortalama COP değerleri elde edilmiş ve Elazığ için yatay TKIP sisteminin kullanılabileceğini söylemişlerdir.

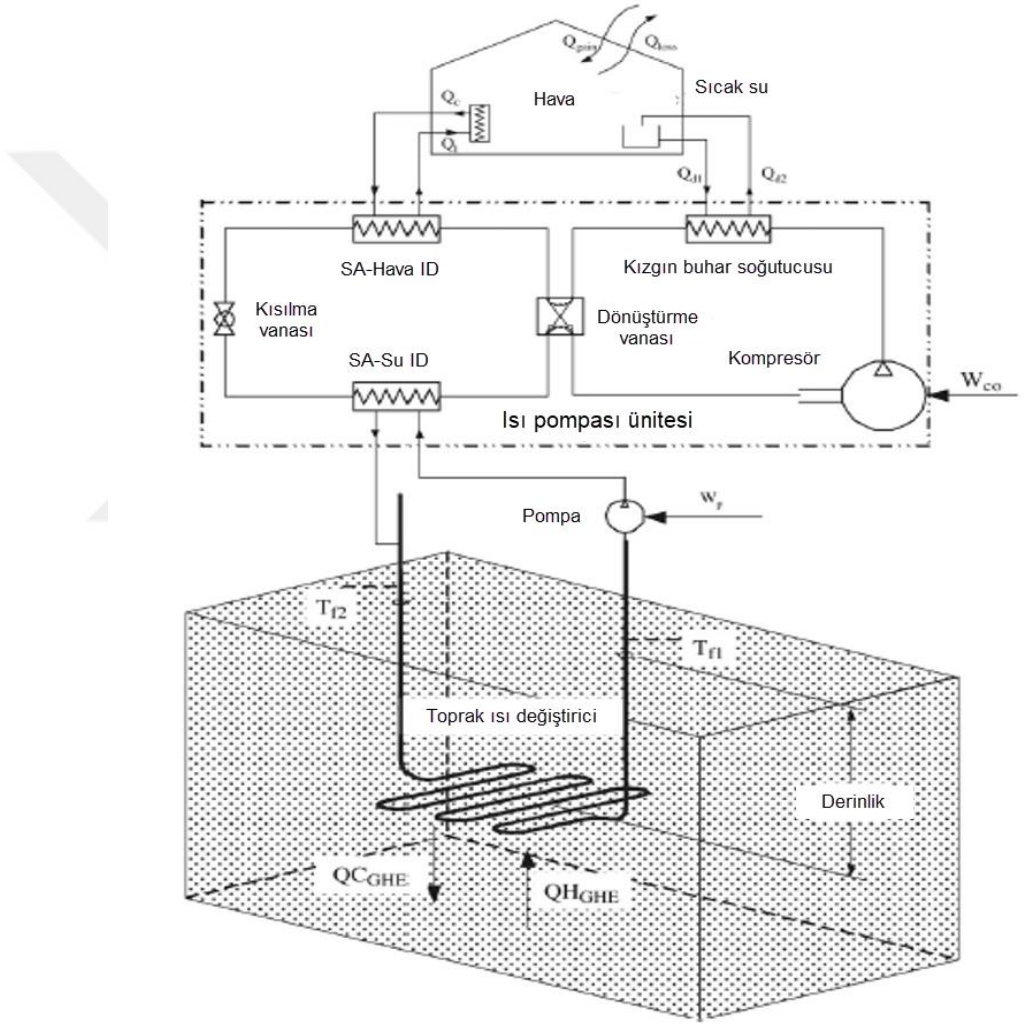


Şekil 3.5 Kurulan deney tesisatının görünümü

H. Esen vd. [51] çalışmalarında Fırat üniversitesinde kurdukları test odasında TKIP ile HKIP'nın termo-ekonomik olarak karşılaştırılmasını yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını 2004 yılının Haziran ile Eylül aylarında soğutma sezonu için yapıp performans değerlerini elde etmişlerdir. Yatay olarak 1 m ve 2 m derinliğe yerleştirilen TID'leri için TKIP'nın COP

değerlerini sırasıyla 3.85 ve 4.26 bulmuşlardır. Soğutma sezonu için TKIP'nın HKIP'na göre ekonomik açıdan daha tercih edilebilir olduğunu söylemişlerdir (Şekil 3.5).

A. Koyun vd. [52] çalışmalarında**,** Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsünde 800 m^{2}'lik bir alanda yerleştirdikleri PPRC ve alüminyum kanatlı boruların etkinliklerini karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalar analitik çalışma ile karşılaştırılmış ve alüminyum kanatlı boru, PPRC boruya göre daha yüksek ısı transfer değerine (%26) sahip olduğunu bulmuşlardır.



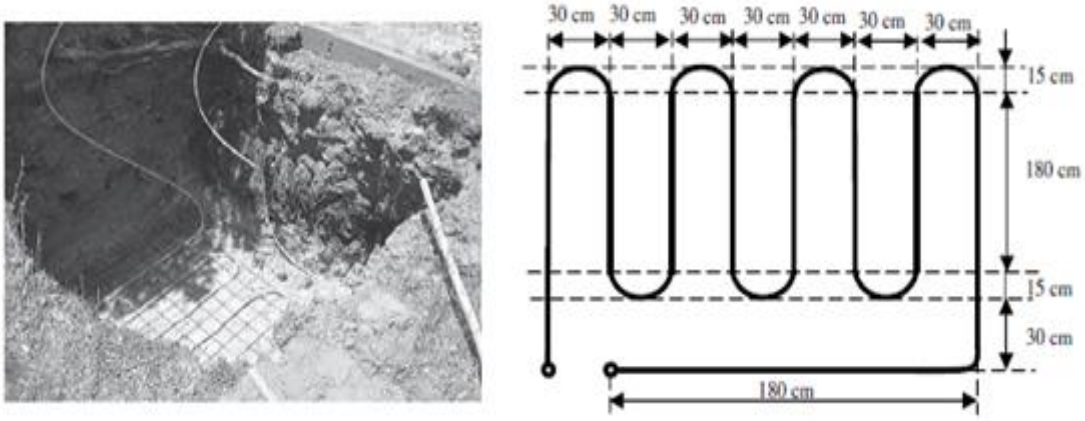
Şekil 3.6 Kurulan deney tesisatının görünümü

V.R. Tarnawski vd. [53] Japonya'da ısıtma sezonu için 5.5 kW, soğutma sezonu için 3.3 kW sağlandığı 200 m^{2}'lik bir villa için yatay olarak toprağa yerleştirilmiş olan TKIP'nın bilgisayar simülasyonunu ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Soğutma sezonunda kullanıldığında kısa sürede kendini amorti ettiğini ve Kuzey Japonya'da şehirden uzak

bölgelerde evsel ve sanayi kullanımında yatay TID'si uygulamasının uygun olduğunu söylemişlerdir (Şekil 3.6).

E. Pulat vd. [54] çalışmalarında yatay TKIP'nın Bursa'da ısıtma sezonunda çeşitli sistem parametrelerinin performans üzerine etkilerini incelemişlerdir (Şekil 3.7). Laboratuvar şartlarında yapılan testlerde topraktan çekilen ısı ve test odasına verilen ısı, evaporator ve kondenser yükleri, toplam güç tüketimi ve tüm sistemin ve ısı pompası ünitesinin COP değerleri elde etmişlerdir. Dış hava sıcaklığının sistem kapasitesi üzerine etkisi ve ortalama toprak sıcaklığının ve dış hava sıcaklığının COP üzerine etkilerini göstermişlerdir. TKIP sistemi ile konveksiyonel ısıtma metotlarını ekonomik olarak karşılaştırılmış ve TKIP sisteminin diğer bütün konveksiyonel ısıtma metotlarından daha verimli olduğunu söylemişlerdir.

S. Li vd. [55] çalışmalarında U-tipi ısı değiştiricisi etrafında toprağın sıcaklık dağılımını incelemiş ve geleneksel TKIP yerine çok fonksiyonlu TKIP kullanılmasının daha verimli olduğunu söylemişlerdir. 3 boyutlu olarak Fluent programında TID etrafındaki toprak sıcaklığını irdelemiş ve geleneksel TKIP kullanıldığında toprak sıcaklığının yükseldiğini, çok fonksiyonlu TKIP kullanıldığında toprak sıcaklığındaki yükselmenin önüne geçildiğini göstermiştir. Bu yeni sistemin kullanılmasının enerji verimliliğini arttırdığını ifade etmiştir.

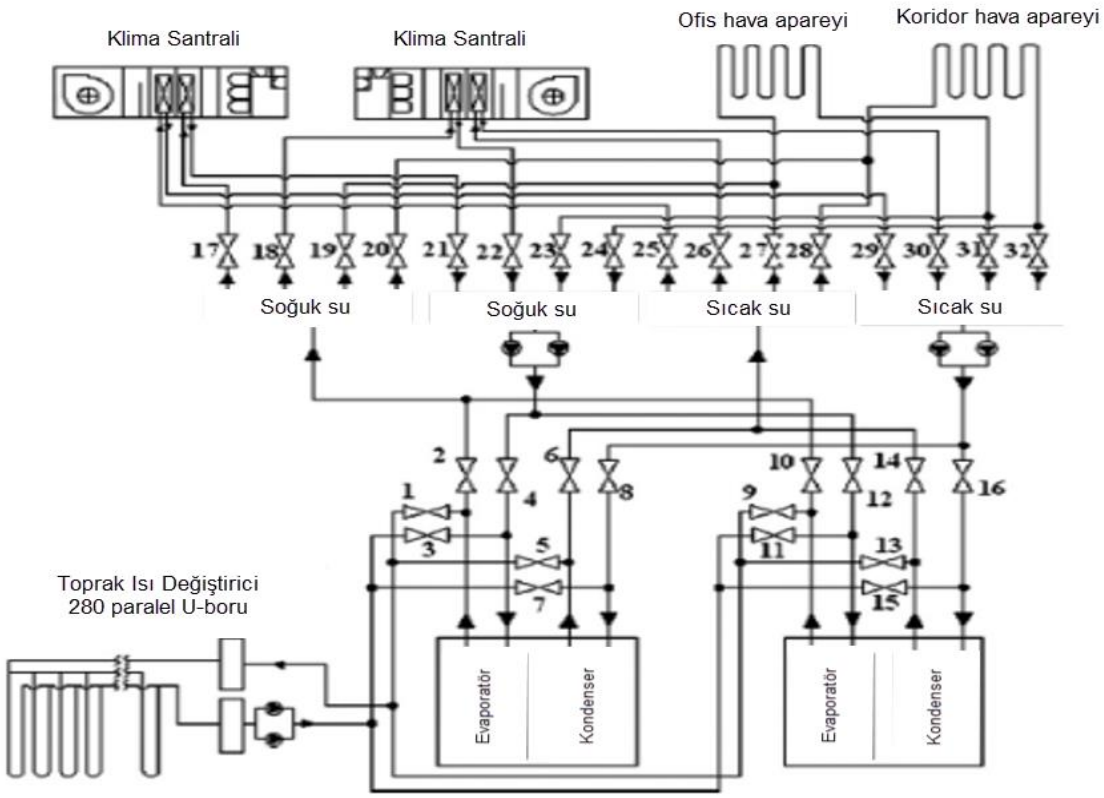


Şekil 3.7 Kurulan deney tesisatının genel ve şematik görünümü

K. Bakırcı [56] çalışmasında Türkiye'nin soğuk iklimine sahip Erzurum'da toprağa dikey yerleştirilmiş TKIP sisteminin performansını incelemiştir. Seri olarak dikey bağlanmış TID sistemi kurmuş ve 2008-2009 yıllarının ısıtma sezonunda deneysel veriler almıştır.

Deneysel veriler sonucunda ısı pompasının ve tüm sistemin sırasıyla COP değerlerini 3 ve 2.6 bulmuş ve bu kurulan TKIP sisteminin Türkiye'nin soğuk iklimi olan Erzurum'da konut ısıtmasında kullanılabileceğini söylemiştir.

R. Karabacak vd. [57] Pamukkale Üniversitesinde kurmuş oldukları 225 m boru uzunluğunda dikey olarak toprağa 110 m derinlikte U-tipi boru yerleştirmişlerdir. Borunun belirli bölgelerine termokulplar yerleştirilip derinliğe göre sıcaklığın değişimini ve meteorolojiden aldıkları güneş radyasyonu, bağıl nem, dış hava sıcaklığı ve rüzgâr hızının sistemin performansı olan COP'nin üzerine etkisini incelemişlerdir. Isı pompası ve tüm sistemin COP aralığını sırasıyla 3.1-4.8 ve 2.1-3.1 bulmuşlardır. Sistemde derinliğe göre toprağa bırakılan ısı akısını 27-93 W/m ve toprak ısıl iletkenliğini de 0.55-2.24 W/m ^{o}C olarak bulmuşlardır.



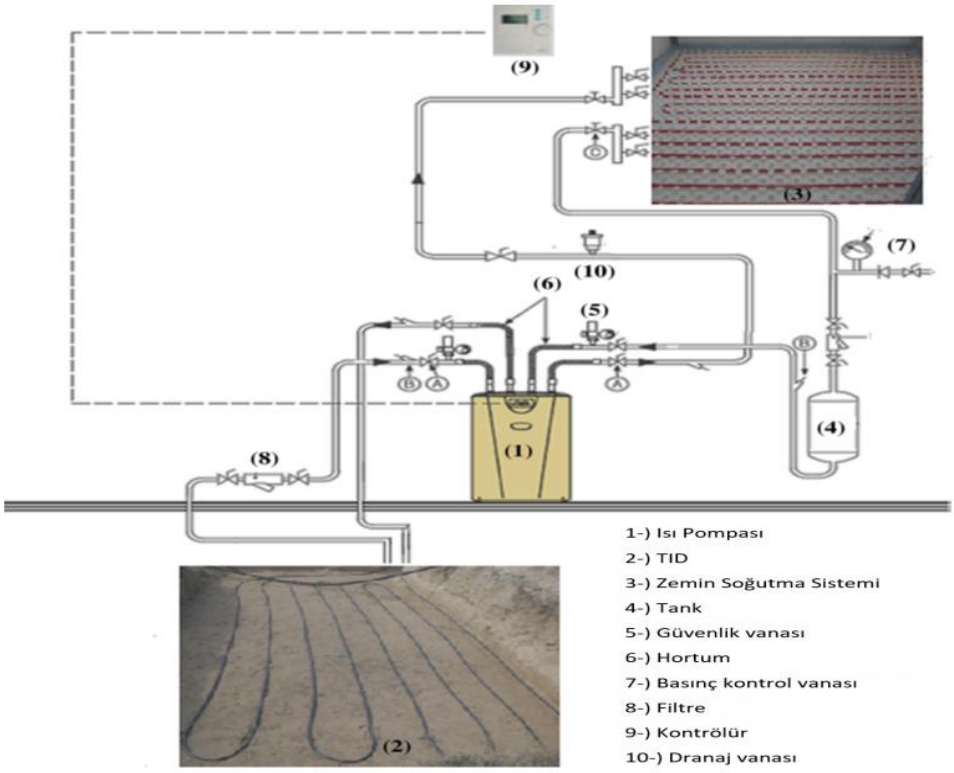
Şekil 3.8 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü

O. Ozyurt vd. [58] Atatürk üniversitesinde bulunan enerji laboratuvarında kurmuş oldukları 53 m derinliği olan dikey TKIP sistemini incelemişlerdir. Isı pompası ve tüm sistemin COP aralığını sırasıyla 2.43-3.55 ve 2.07-3.04 bulmuşlardır. Bu kurulan TKIP

sisteminin Türkiye'nin soğuk iklimi olan Erzurum'da konut ısıtmasında kullanılabileceğini söylemiştir.

X. Yu vd. [59] çalışmalarında Çin'de Shanghai şehrinde bir arşiv binasında klima sistemlerinde TKIP'nı kullanarak sabit sıcaklık ve sabit nem elde etmek için 280 tane U-tipi boru toprağın altına gömmüşlerdir (Şekil 3.8).

Soğutma zamanında kondenserden çekilen ısının bir bölümünü toprağa bırakırken kalanı hava kontrol ünitesindeki havayı tekrar ısıtmak için kullanmışlardır. Bu binanın yaz ve kış aylarında soğutma kapasitesi sırasıyla 472 kW, 463 kW ve yaz ve kış için ısı pompası ve TKIP sisteminin COP'si sırasıyla 5.4 ve 3, 5.2 ve 2.9 olduğunu söylemişlerdir. Bu sistemi HKIP ile karşılaştırdığımızda çalışma maliyeti % 55.8 düşerken, geri ödeme süresi 2 yıl olduğunu, kazan sistemi ile su soğutmalı ile karşılaştırıldığında çalışma maliyeti % 48.4 düşerken, geri ödeme süresi 4 yıl olduğunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 3.9 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü

R. G. Gonzalez vd. [60] çalışmalarında Drayton St Leonard (Oxfordshire, UK) 'da kurulmuş olan yatay sarmal TID'sinde 2 farklı toprak yapısı için 1 yıllık ölçüm alınmıştır. 2 toprak yapısında da 1 m derinlikte belirli bölgelerde ölçüm alınarak dinamik dış

çevrenin TKIP'nın performansı üzerine etkisini incelenmiştir. Toprak yapısının heterojenliğinin, TKIP'nın üzerinde önemli rol oynadığını söylemişlerdir.

N. Naili vd. [61] çalışmalarında Tunus'ta yatay TKIP'nı kullanarak 12 m^2'lik bir odanın zeminini PEX borularıyla radyant zemin soğutma (RFC) yaparak performans değerlerini araştırmışlardır (Şekil 3.9). Deneysel sonuçlardan ısı pompası ve tüm sistem COP'si sırasıyla 4.25 ve 2.88 elde edilmiş ve Tunus'taki binaların soğutma için TKIP kullanmasının çok uygun olduğunu söylemişlerdir.

N. Naili vd. [62] çalışmalarında boruların yatay konfigürasyonda gömülmüş TID'sinin performansını deneysel ve analitik olarak analiz etmişlerdir. TID'sinde kütlesel debi, uzunluk, gömme derinliği ve giriş sıcaklığının ısı transferine etkisi incelenmiş ve deneysel çalışmalar sonucunda ısı pompasının ve tüm sistemin COP'si sırasıyla 3.8-4.5 ve 2.3-2.7 arasında bulunmuştur. TKIP'nın soğutma sezonunda Tunus'ta kullanılmasının uygun olduğunu söylemişlerdir.

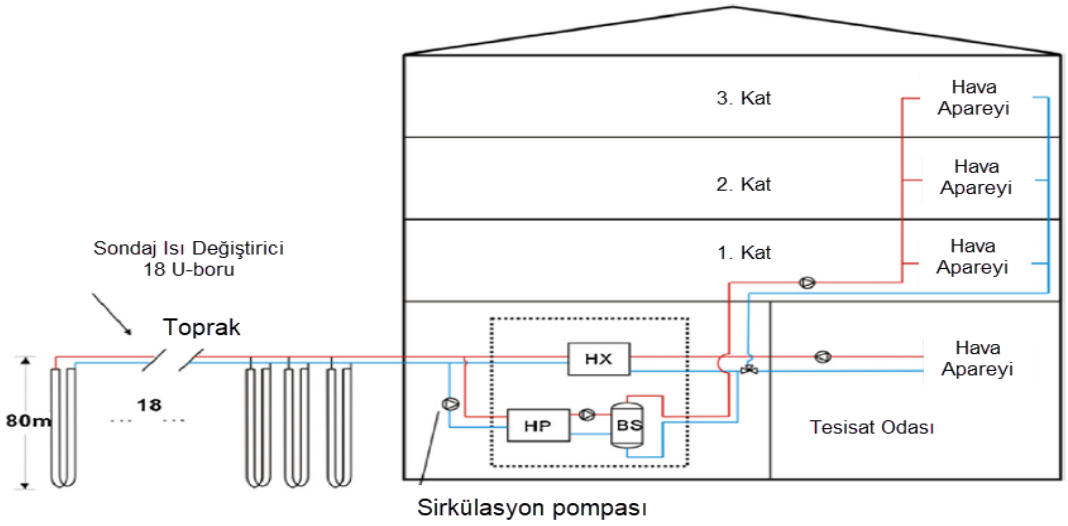
Y. Shang vd. [63] çalışmalarında U-tipi dikey olarak toprağa yerleştirilmiş, kesikli şekilde çalışan TKIP sistemi deneysel olarak incelenmiş ve topraktaki sıcaklık değişimini gözlemlemişlerdir. Optimum kesikli çalışma zamanı belirlenmediğinde performans ve toprak sıcaklığında ani düşüşlerin olduğunu ve optimum dolgu maddesi belirlenirse TKIP sisteminde yüksek ısı kapasitesi ve yüksek ısıl yayılım olacağından sıcaklık daha hızlı transfer edileceğini söylemişlerdir.

Z. Xiong vd. [64] çalışmalarında dikey gömülü sistemlere nazaran kurulumu daha az maliyetli olan ve daha az sondaj derinliği gerektiren yatay TKIP sistemlerden biri olan Sarmal-tipi modelin geliştirilmesini ve doğrulamasını yapmışlardır. U-tipi 3 yatay ısı değiştiricisi 1.5 metre derinliğe, her biri farklı ölçülerde toprağa gömülüp, 3 kısa süreli ve 1 uzun süreli olmak üzere ölçümler yapılmıştır. Çalışma yatay bir sistem üzerinde yapılmış olmasına karşın dikey kuyularda kullanılan yaklaşımlar kullanılmış ve Sarmal-tipi sistemlerin tercih edilebilirliği kanıtlanmıştır.

D. Adamovsky vd. [65] toprak sıcaklık analizlerini, ısı akılarını ve lineer yatay ısı değiştiricisi yoluyla toprak kitlesinden transfer olan enerjiyi incelemişlerdir. 3 yıl boyunca 0^oC üzerindeki tüm ısınma dönemlerinde ölçümler yapılmıştır. 30-50 mm çapındaki ısı değiştirici boruları 1-2 m derinliğe gömülmüştür. COP_{hp} değerinin 3.1 ile 3.6 arasında

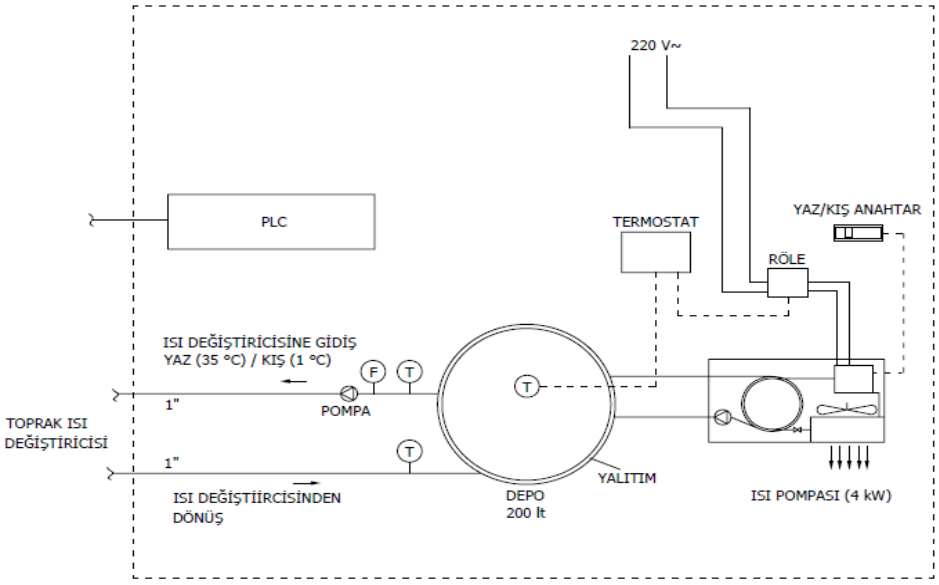
COP_{sys} değerinin 2.7 ile 3.3 arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca kuru ortamlarda COP değerlerinin optimum nemli ortama göre yaklaşık %35 daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir

J. Luoa vd. [66] Almanya'nın Nuremberg şehrinde bir ofis binasında kurmuş oldukları dikey TKIP sistemini 4 yıllık periyotta incelemişlerdir (Şekil 3.10). 80 m derinlikte dikey olarak 18 tane U-tipi boru gömülmüş olan sistemde ısınma sezonunda COP değeri 3.9 bulunurken, soğutma sezonunda EER=8 olarak bulunmuştur. 4 yıllık periyotta sezonsal performans % 8.7 (SEER) artarken, sezonsal COP değeri % 4 düşmüş olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 3.10 Kurulan deney tesisatının şematik görünümü

H. Demir vd. [34] çalışmalarında yatay olarak toprağa serilmiş TID'si için sayısal bir model geliştirmiş ve bu modeli YTÜ Davutpaşa kampüsünde kurmuş oldukları 800 m^2'lik deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır (Şekil 3.11). Deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasında maksimum sapmanın % 10.03 olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapmış oldukları bu simülasyon sonuçlarını literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmışlardır.



Şekil 3.11 Kurulan deney tesisatının görünümü

Çizelge 3.1'de Toprak kaynaklı yatay ısı pompası ve Toprak kaynaklı dikey ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar görülmektedir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar

No.	Araştırmacı ve Yıl	Ülke	TKYIP	TKDIP	Yaklaşım ve İşlem Parametreleri
1	Ingersoll ve Plass (1948, 1954), [8]	ABD		S	Çizgisel kaynak teorisini baz alarak sonsuz ortamda herhangi bir noktadaki sıcaklık elde edilmiştir.
2	Metz (1981), [67]	ABD	D		1 yıl süren çalışmada yatay kolektör 2 metreye gömülmüş, sadece ısı pompası SPF analizi yapılmıştır.
3	Parker ve White (1982), [68]	ABD	D		2 yıl süren çalışmada yatay kolektörler 2 metre derinliğe gömülmüştür. Çalışma performans gelişimi konusunda veri vermemiştir.
4	Bose (1984, 1988), [10]	ABD		S	Kelvin çizgisel kaynak teorisini kullanarak TID'si uzunluğunu yılın en sıcak ve en soğuk ayı için geliştirmiştir. Modelinde mevsimlik performansı ve sistem enerji tüketimini hesaplamıştır.
5	Kavanaugh (1985), [12]	ABD		S	Silindirik kaynak çözümünde sabit yüzey sıcaklığı veya sabit ısı akısı kabulü kullanarak gömülü boru etrafındaki sıcaklık dağılımı ve ısı geçişini incelemiştir.
6	Hart ve Couvillion (1986), [13]	ABD		S	Çizgisel kaynakla toprak arasındaki zamana bağlı sürekli ısı geçişini ve çizgisel kaynak etrafındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımını incelemişlerdir.
7	Mei ve Emerson(1986), [21]	ABD	S		Yatay kolektörün çevresindeki toprağın donması incelenmiş, sürekli iklimlerde ve donma noktasının altında çalışacak kolektörlerin tasarlanması önerilmiştir.
8	Eskilson (1987), [19]	İsveç		S	Toprağın ısı akısına tepkisini uzun zamanlı olarak çözmek için tasarlanmış ancak kısa zaman tepkilerini doğru hesaplayamamış ve g-fonksiyonlarını sağlayan sayısal model kuyu geometrisini dikkate alınmamıştır.
9	Hellstrom (1989, 1991), [16-17]	İsveç		S	Küresel ve bölgesel problemler için sayısal yöntemleri kullanan ve bunları kararlı akış bölümünde analitik sonuca uygulayan melez bir modeldir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

10	Negiz vd. (1993,1995), [24-25]	Türkiye	S		Üç boyutlu ve zamana bağlı olarak silindirik koordinatlarda toprağa gömülü bir boru içerisindeki akışkandan olan ısı geçişini incelemiş ve çözümünde ADI yöntemi uygulanmıştır. Boru içindeki akışkanda, boru cidarında ve topraktaki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.
11	Muraya vd. (1996), [23]	ABD		S	U borular arasındaki ısıl etkileşimi belirlemek için geçici rejimde iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanmıştır.
12	Piechowski (1996), [1]	Avustralya	D S		1.8 m'ye gömülen yatay kolektörler ile toprağın soğuma aşamasındaki termal kapasitesi üzerine 2 aylık bir çalışma yapılmıştır.
13	Thornton vd. (1997), [18]	ABD		S	Hellstrom modelini kullanarak bir TRNSYS adlı yazılım programı geliştirilmiş ve bu yazılım programının giriş suyu sıcaklıklarını oldukça iyi tahmin ettiği söylenmektedir.
14	Mihalakakou vd. (1996), [69]	İrlanda	D		6 ay süren çalışmada farklı toprak tiplerindeki ısı tutumunun karakteristiği üzerine çalışılmıştır. Kaynak sıcaklığının asfaltta, kısa çimden 1 derece daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
15	Rottmayer vd. (1997), [20]	ABD		S	U boru ısı değiştiricisinin düşey kesitindeki yanal ısı geçişini hesaplamak üzere kutupsal bir ızgara üzerinde iki boyutlu sonlu fark formülasyonu uygulanmıştır.
16	Mukerji vd. (1997), [15]	ABD	D S		Rastgele sarımlı gömülü borulardaki ısı geçişini kararlı hal koşulları için incelemiş ve geliştirilen model toprağın altına gömülen düz yatay borular için yapılan deneysel çalışmayla karşılaştırılmıştır.
17	Leong vd. (1998), [70]	ABD	S		Çalışmada nemin ısı pompasının performansına etkisini incelemiştir.
18	Shonder ve Beck (1999), [22]	Almanya		S	U boru ısı değiştiricisinde boruların ve ısı taşıyıcı akışkanın kapasitesini hesaplamak için, eşdeğer çaptaki etkin tek boru çevresinde sonlu kalınlıkta bir ince film tabakası olduğunu düşünerek bir model geliştirmişlerdir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

19	Chung vd. (1999), [14]	ABD	S		Üst yüzeyinden taşınımla ısı geçişi olan yarı sonsuz ortam içine gömülü ve sabit yüzey sıcaklığına sahip borudaki ısı geçişi problemi yarı analitik olarak çözülmüştür.
20	Chiasson ve Chiasson vd. (1999,2000), [26-27-28]	ABD	D S		Yatay toprak kaynaklı bir ısı pompası kullanarak kaldırımların ısıtılması durumundaki ısı geçişini incelemişlerdir. Kaldırımın üst yüzeyinde meydana gelen bütün yüzey ısı akılarının etkileri çözüme dahil edilmiştir.
21	Eugster ve Rybach (2000), [71]	İsviçre		D S	Yıllar süren termal ekstrüzyonun sondaj kaynak sıcaklığına etkisi üzerine çalışılmıştır.
22	Ito vd. (2001), [72]	Japonya		D S	Laboratuvar ortamında sürdürülen çalışma kaydedilmiş verilere dayandırılmış olup, dikey ve ortam hava kolektörü birlikte kullanılmıştır, ayrıca numerik bir çalışma yapılmıştır.
23	Popiel vd. (2001), [73]	Polonya	D		1 yıl süren çalışma ile zemin sıcaklığının iklimle olan ilişkisi geliştirilmiştir.
24	Li vd. (2003), [74]	Çin		S	Dikey TKIP'nın en iyi çalıştığı iklim tipi 1 yıllık çalışma ile tespit edilmiştir.
25	Hepbasli vd. (2003), [49]	Türkiye		D	Dikey yerleştirilen 50 m'lik U boru kullanılan çalışma sonucu, ısıtma soğutma analizleri yapılmış, derinliğe göre toprağa bırakılan ısı akısını ortalama 11 W/m bulunmuştur.
26	Huang ve Murphy (2003), [75]	ABD		S	Isı pompası performansı günlük değerler ile numerik hesaplanması yapılmıştır. İletimin tek ısı transfer yolu olarak kullanıldığı durumlarda, dikey kolektörün termal ekstrüzyonun dikkatlice ayarlanması gerektiği belirtilmiştir.
27	Romero vd. (2005), [76]	İspanya		D	1 yıllık çalışma ile ısı pompası COP değerleri oluşturulmuştur, TKIP'nın HKIP'na göre yüksek verim sağladığı saptanmıştır.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

28	Lindholm vd. (2005), [77]	İsveç		S	Isı pompasının deneysel verilerini içermeyen deney, TKIP ve HKIP'nın kaynak olarak kullanıldığı bir tasarım oluşturmuştur.
29	Dumont ve Frete (2005), [78]	Belçika	D		9 ay süren çalışmada 0,6 m'ye gömülen yatay kolektörler kullanılmış olup, COP ve zemin sıcaklığı kaydedilmiştir.
30	Esen ve İnallı (2004), [50]	Türkiye	D S		Fırat Üniversitesi'nde kurdukları TKIP düzeneğinin performans analizlerini yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmanın yanında sonlu fark yöntemi kullanarak numerik çalışmalarla doğrulama yapmışlardır. Topraktaki ısı transferi için olan nümerik model yardımıyla boru civarındaki sıcaklık dağılımını belirlemişlerdir.
31	Esen vd. (2006), [51]	Türkiye	D		Yatay olarak 1m ve 2m derinliğe yerleştirilen borularla TKIP'nın COP değerlerini sırasıyla 3.85 ve 4.26 bulmuşlardır. Soğutma sezonu için TKIP 'nın HKIP'na göre ekonomik açıdan daha tercih edilebilir olduğunu söylemişlerdir.
32	Esen vd. (2007), [29-30]	Türkiye	D		2 farklı derinliğe gömülen HGHE'ın ısıtma sezonu için TKIP'nın enerji ve ekserji analizleri incelenmiştir. 2 m derinlikte olan HGHE'nin 1m derinlikte olana göre ekserji yıkımı %2 daha az olduğunu ve referans çevre sıcaklığın artmasıyla her iki HGHE'inde ekserji verimliliği azaldığını ortaya koymuşlardır.
33	Karlsson ve Fahlen (2007), [79]	İsveç	D S		Laboratuvar bazlı deneysel çalışmalar yapılmış olup, kenar talep kapasitesi kontrol edilen TKIP'nın performansı incelenmiştir.
34	Zogou ve Stamatelos (2007), [80]	Yunanistan	S		Yunanistan'da bulunan bir konutun yıllık termal performansı TRNSYS 16 adlı programda simüle edilmiştir. Konut simüle edilirken konvansiyonel çiller-kazan sistemi ve toprak kaynaklı ısı pompası kıyaslanmıştır. Yıllık kıyaslama sonuçlarına göre COP karakteristikleri, ekipman boyutları vb. Tasarım parametreleri bulunmuştur.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

35	Mustafa Ömer (2008), [81]	Birleşik Krallık	S		Birleşik Krallık'ta tekno-ekonomik olarak yürütülmüş bu çalışma, farklı sistemlerde TKIP'nın kalitesini belirtip, ılıman iklimler için HKIP önermiştir. Ampirik veya literatüre dayanmamaktadır.
36	Nam vd. (2008), [31]	Japonya	D S		Belirli bir şekli olan ısı değiştirici modeli ile yeraltı su akışıyla ısı taşınım modelini birleştirerek numerik bir model oluşturulmuş, deneysel çalışmalarla numerik çalışmalar çok iyi sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur.
37	Tarnawski vd. (2009), [53]	Japonya	D S		Yatay olarak toprağa yerleştirilmiş olan TKIP bilgisayar simülasyonunu ve analizini incelenmiştir. Şehirden uzak bölgelerde evsel ve sanayi kullanımında yatay döngü uygulamasının uygun olduğunu söylemişlerdir.
38	Shuhong vd. (2009), [55]	ABD	D		TID'si etrafındaki toprak sıcaklığını irdelenmiş ve geleneksel GSHP kullanıldığında toprak sıcaklığının yükseldiğini, MFGSHP kullanıldığında toprak sıcaklığındaki yükselmenin önüne geçildiğini gösterilmiştir.
39	Koyun vd. (2009), [52]	Türkiye	D S		Dönemsel olmayan bu çalışmada 1,8 m'ye gömülmüş yatay kolektörler kullanılmış ve geliştirilmiş, boru dizaynı üzerine çalışılmıştır.
40	Demir vd. (2009), [34]	Türkiye	D S		Yatay olarak toprağa serilmiş TID'si için sayısal bir model geliştirilmiş ve arasında maksimum sapmanın % 10.03 olduğunu ortaya konmuştur.
41	Pulat vd. (2009), [54]	Türkiye	D		Yatay TKIP'nın Bursa'da ısıtma sezonunda çeşitli sistem parametrelerinin performans üzerine etkilerini incelemişlerdir. TKIP sisteminin diğer bütün konveksiyonel ısıtma metotlarından daha verimli olduğunu söylemişlerdir.
42	Lamarche (2009), [82]	Kanada		S	Toprak kaynaklı ısı pompalarının saatlik enerji simülasyonlarının yapılması için rastlantısal cevap faktörü (arbitrary response factor) kullanarak hızlı bir algoritma geliştirmiştir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

43	Bakırcı (2010), [56]	Türkiye		D	Seri olarak dikey bağlanmış TID sistemi kurulup veriler toplanmış, COP değerleri 3 ve 2,6 bulunmuştur. Sistemin konut ısıtmasında kullanılabileceğini söylenmiştir.
44	Sanaye ve Niroomand (2010), [32]	İran	S		Yatay olarak toprağa TKIP'nın optimum tasarımını yapmak için ısıl ve ekonomik simulasyonu ve optimizasyonu yapılmış, çeşitli parametreler incelenip bir amaç fonksiyonu tanımlayarak TKIP için ekonomik analiz incelenmiştir.
45	Karabacak vd. (2010), [57]	Türkiye		D S	225 m boru uzunluğunda dikey olarak toprağa 110 m derinlikte U boru yerleştirilmiştir, COP aralığı 3,1-4,8 ve 2,1-3,1 bulunmuştur.
46	Özyurt vd. (2010), [58]	Türkiye		D S	53 m derinliği olan dikey GSHP sistemini incelenmiştir. COP aralığını sırasıyla 2.43-3.55 ve 2.07-3.04 bulunmuştur.
47	Yu vd. (2010), [59]	Çin	D		Klima sistemlerinde TKIP'nı kullanarak sabit sıcaklık ve sabit nem elde etmek için 180 tane U boru toprağın altına gömülmüştür. GSHP sisteminin COP 'si 5.4 ve 3, 5.2 ve 2.9 bulunmuştur.
48	Wu vd. (2010), [83]	Birleşik Krallık	D S		Yatay TKIP'ında slinky ısı değiştiricisinin termal performansı farklı sarım çapları ve slinky iç mesafesi (slink interval distance) için 3 boyutlu bir model kullanılarak araştırılmıştır. 2 aylık periyot için çalışma süresi (running time) ile COP'un düştüğü gözlemlenmiş ve ortalama COP 2.5 olarak belirlenmiştir. Nümerik tahminler spesifik ısı çekiminde farklı boru çapları için kayda değer bir farklılık olmadığını göstermiştir. (Buna rağmen en büyük çapta en fazla ısı çekimi gözlemlenmiştir. Sarım merkez iç mesafesinin artmasıyla ise spesifik ısı çekiminin artmasına rağmen toprağın her bir metre uzunluğu için azaldığı tespit edilmiştir.
49	Greene vd. (2010), [84]	İrlanda	S		Akışkanın dönüş sıcaklığının hesaplanabilmesi için TID'si ve çevresindeki toprak sıcaklığının ısı akısına dayalı simülasyonu yapılmıştır.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

50	Congedo vd. (2011), [85]	İtalya	S		İtalya'nin güneyinin iklim koşulları baz alınarak 1 yıl süreyi kapsayan CFD simülasyonları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda en yüksek termal kondaktivite ısı değiştirici civarında 3 W/mK olarak bulunmuştur. Akışkan hızının önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Yatay ısı değiştiricilerde gömme derinliğinin sistem performansında önemli bir rol oynamadığı, helisel ısı değiştirici düzenlemesi yapılmasının ise en önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir.
51	Fujii vd. (2011), [86]	Japonya	S		Ticari, sonlu eleman simülasyon programı FEFLOW kullanılarak sarmal yatay ısı değiştiricilerinin optimum tasarımı üzerine çalışılmıştır.
52	Xing vd. (2011), [87]	ABD	S D		Bina çevresine döşenen ısı değiştirici borularının (FHX) boyutlandırılmasında kullanılmak üzere nümerik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik modeli deneysel bir çalışmayla doğrulanmıştır.
53	Gonzalez vd. (2012), [60]	Birleşik Krallık	D		2 farklı toprak yapısında 1 m derinlikte ölçüm yapılarak toprak yapısının heterojenliğinin, TKIP üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir.
54	Cimmino vd. (2012), [36]	İtalya		S	Çalışmalarında Eskilson'nun geliştirmiş olduğu g-fonksiyon konseptini kullanarak sondaj alanının termal davranışının nasıl olduğunu incelemiştir. G-fonksiyonuna yaklaştırmak için önerdikleri yeni modelde sondaj kuyuları arasında ısıl etkileşimden dolayı sondaj kuyuları arasında ısı aktarmalarındaki değişimi ve sondaj derinliğinin sondaj kuyusu yüksekliğine oranının (D/H) değişimini incelemişlerdir.
55	Li vd. (2012), [88]	Japonya	D S		Spiral bir ısı değiştiricinin ısıtma performansının analizi için metodoloji önerilmiştir. Spiral ısı değitricinin neden olduğu topraktaki sıcaklık değişimin belirlenmesi için dairesel kaynak modeli kullanılarak analitik çözümler yapılmıştır. Isı değiştrici boyutlarının belirlenmesi için hızlı bir algoritma geliştirilmiştir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

56	Chong vd. (2012), [89]	Birleşik Krallık	S		Geliştirilen üç boyutlu numerik model ile çeşitli yatay sarmal ısı değiştiricilerinin termal performanları ve konfigürasyonları incelenmiştir. Isı transfer oranları, ihtiyaç duyulan boru malzemeleri, kazı iş yükleri kıyaslanmış ve sonuçlara göre sistem parametrelerinin termal performans üzerindeki etkisinin öenmli olduğu belirtilmiştir.
57	Satsangi vd. (2012), [90]	Hindistan		S	Mahal ısıtması için kullanılan bir TKIP'nın termodinamik modellemesi yapılmıştır. 5kW lık ısıtma yükü için R22 ve R134a akışkanları kıyaslanmış ve R134a'nın COP değerinin yüksek aynı zamanda çevre dostu olduğu belirtilmiştir.
58	Self vd. (2012), [91]	Kanada		S	Ekonomizer kullanılmış bir buhar sıkıştırma çevriminin parametrik enerji analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre COP üzerine etki eden parametreler etki büyüklüğüne göre, kondenser basıncı, evaporator basıncı, akışkanın sıkıştırılma derecesi, orta basınç, kızgınlık derecesi şeklinde sıralamıştır.
59	Naili vd. (2013), [61]	Tunus	D		Yatay gömülen ısı değiştiricinin deneysel ve analitik performansı incelenmiştir. 3.8-4.5 ve 2.3-2.7 COP değerleri bulunmuştur.
60	Naili vd. (2013), [62]	Tunus	D		Zemini yatay kaynaklı ısı pompası kullanılarak döşenmiş bir odada çalışılmış ve COP'ler 4.25 ve 2.88 olarak elde edilmiştir.
61	Florides vd. (2013), [35]	Güney Kıbrıs	D S	D S	Dikey ve yatay TID'sinin matematiksel modellemesini yaparak verimliliklerini karşılaştırmışlardır. Dikey 2 tane 100 metrelik U boru ve yatay 4 tane 50 metrelik boru kullanılarak ölçümler yapılmış ve U borunun simulasyon sonuçları ölçülen sonuçlarla oldukça iyi benzeşme gösterdiğini söylemişlerdir.
62	Lamarche (2013), [37]	Kanada	S	S	Sonsuz çizgi kaynak ve sonsuz silindirik kaynak çözümlerini ve klasik çözümlerin kısa vadeli davranışlarını incelenmiş ve literatürde kabul edilenden daha farklı sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

63	Cho ve Choi (2013), [92]	Güney Kore		S	TKIP'nın performansı ve TID'sinin boyutunun nasıl belirleneceği konusunda çalışılmış, bir tasarım yapılırken TID'sinin boyutu ve TKIP'nın performansı beraber düşünülmesi gerektiği söylenmiştir.
64	Fujii vd. (2013), [93]	Japonya	D S		Tek ve çift katman sarmal yatay ısı değiştiricilerinin ısı alışveriş kapasitini kıyaslamak için Fukuoka Japonya'da ısıtma ve soğutma testleri yapılmıştır. Testler ısı alışveriş kapasitesinin çift katman yatay TID'si kullanarak önemli bir biçimde iyileştiğini göstermiştir. Geliştirilen nümerik model kullanılarak çift katman yatay ısı değiştiricilerinin tasarım optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmış ve alt katmanın derinliği iki metreye sabitlendiğinde üst katmanın optimum derinliğinin 1.5 m olduğu belirtilmiştir. Toprak yüzeyinin yansıtıcılığı üzerine değişen albedolar ile çalışmalar yapılmış ve ısıtma operasyonlarında düşük albedo, soğutma operasyonlarında ise yüksek albedoların tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir.
65	Alalaimi vd. (2013), [94]	ABD	S	S	Toprak kaynaklı ısı pompalarında sistem boyutlarının performans üzerine etkileri incelenmiştir. Minimum toplam güç gereksinimi ve maaliyet sınırlamalarına bağlı kalınarak optimum ısı pompası ve TID'si boyutları nümerik olarak incelenmiştir.
66	Simms vd. (2013), [95]	Kanada	S		Toprağın yapısal homejenliğinin yatay toprak kaynaklı ısı pompalarının performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemelerde heterojenliğin performansa etkinin %2 den daha az olduğu ve ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir.
67	Retkowski ve Thöming (2013), [96]	Almanya		S	Lineer olmayan programlama yaklaşımıyla dikey toprak kaynaklı ısı pompalarının tasarım problemlerinin çözümü üzerine araştırmalar yapılmış ve iki nümerik çözüm alternatifi irdelenmiştir.
68	Robert ve Gosselin (2013), [41]	Kanada		S	Dikey TID'li ısı pompası sisteminin toplam maliyetini minimize etmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Sondaj sayısı ve derinliğin maliyet, duyarlılık analizinde en önemli parametre olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

69	Wu vd. (2013), [97]	Çin		S	Uzun periyotta TKIP sisteminim verimli çalışması ve termal dengesizliklerin azaltıması için hibrit bir system önermişlerdir. Hibrit ısı pompalarının (GSAHP +borehole free cooling) potensiyelinin araştırılması için TRNSYS adlı program kullanılarak 3 farklı şehir için farklı dinamik simülasyon uygulamaları yapılmıştır. Toprak kaynaklı absorbsiyonlu ısı pompalarının enerji verimliliğinin ısıtmada % 95-120 civarı kalırken hibrit sistem ile bu değerin % 111-156 dolaylarına çıkarılabileceği belirtilmiştir.
70	Kwak vd. (2013), [98]	G. Kore	S	S	Daha önce yapılmış deneylerden elde edilen veriler kullanılarak yatay ve dikey toprak kaynaklı ısı pompalarının termo-ekonomik analizi yapılmıştır. $0.140/kWh'lık elektrik birim maaliyeti için odaya ulaşan ısının birim maaliyeti $0.063/kWh olarak hesaplanmıştır. Tersinmezliklerden dolayı oluşan ekserji yıkımı ve parasal kayıplar sistemin her bir parçası için hesaplanmış ve en büyük parasal kaybın toprak kaynaklı ısı değiştiricisinde olduğunu belirtilmiştir.
71	Rezaei B. vd. (2013), [33]	ABD	S		TKIP'larının homojen olmayan bir çözüm alanında çalışabilmesi için bir model oluşturulmuştur. Kış koşulları altında yalıtkan olarak araba lastiği bileşenleri kullanılarak sayısal çalışmalar yapılmıştır. Araba lastiği bileşenleri kullanılmasıyla absorbe edilen enerji oranı soğuk iklimlerde %17, ılıman iklimlerde %4 artmıştır ve ılıman şartlara nazaran soğuk şartlarda daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.
72	Gan (2013), [99]	Birleşik Krallık	S		İklim şartları, ısıtma-soğutma yükleri ve toprak şartları dikkate alınarak, TID'lerinin dinamik termal performansı nümerik olarak geliştirilen bir program yardımıyla incelenmiştir. Geliştirilen program kullanılarak çalışma ve başlangıç zamanlarının, gömme derinliklerinin ve toprağın donmasının ısı değiştiricinin performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çalışma zamanının artmasıyla topraktan çekilen ısı oranının azaldığı ve toprağın donmasıyla topraktan ısı çekiminin arttığı belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

73	Choi vd. (2013), [100]	Kore		D	Sera ısıtması için kullanılan toprak kaynaklı çoklu ısı pompalarının performansı incelemiştir.
74	Sivasakthivel vd. (2014), [43]	Hindistan	D	D	TID'sini optimize etmek için Taguchi ve Utility metotları uygulanmıştır. TID'sinin uzunluğunda %15.17 azalma, COP değerinde %2.5 artma o ve TID'sinin ısıl direncinde %17.1 azalma görülmüştür.
75	Wang (2014), [38]	ABD	S	S	3 iklim bölgesi için EnergyPlus simulasyonunda TKIP değişken soğutucu debili sistemi yıllık enerji tüketimi ve enerjinin en yoğun gereksinimi olduğu durumlardaki azalması açısından karşılaştırılmış, TKIP kullanımı yıllık enerji kazanımı, pik yüklerde azalma ve termal konfor arttırmak açısında önemli olduğunu söylenmiştir.
76	Qian ve Wang (2014), [40]	Çin	S	S	TKIP'nin COP 'si ve toprak sıcaklık dağılımını hesaplamak için yeni bir model ortaya koyulmuştur.
77	Nam ve Chae (2014) , [42]	Kore	S		Çalışmalarında yatay ısı değiştiricileri kullanarak enerji temeline yerleştirilen sistemi optimize etmek için toprak ısı aktarma oranının (HER) tahminini numerik simulasyon modeliyle geliştirmişlerdir.
78	Shang vd. (2014), [63]	ABD		D	Dikey olarak U şeklinde toprağa yerleştirilmiş TKIP sistemi deneysel incelenmiş ve topraktaki sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir. GSHP sisteminde yüksek ısı kapasitesi ve yüksek ısıl yayılım olacağından sıcaklığın daha hızlı transfer edileceğini söylenmiştir.
79	Luoa vd. (2014), [66]	Almanya		D	Dikey TKIP sistemini 4 yıllık periyotta incelenmiş, sezonunda COP değeri 3,9 bulunurken, soğutma sezonunda EER değeri 8 bulunmuştur.
80	Bojic vd. (2014), [47]	Sırbistan	S	S	Farklı ısı kaynaklarıyla çalışan farklı radyant ısıtma panellerinin performansları incelenmiştir, yeni geliştirilmiş olan zemin-tavan radyant ısıtma sisteminin performans açısından en iyi, tavan ısıtmanın ise en kötü olduğunu ortaya koyulmuştur.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

81	Nowamooz vd. (2014), [48]	Fransa	S	S	Doymamış toprak tabakalarında zamana ve derinliğe göre değişen ısıl yayılım katsayısının sonlu farklar yöntemini kullanarak ısı dağılımının nasıl gerçekleştiği incelenmiştir.
82	Ouzzane vd. (2014), [101]	Kanada	S	S	Tek boyutlu zamana bağlı ısı iletim denklemlerine dayalı nümerik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model kullanılarak farklı iklimler için konvektif ısı akısının toprak dip sıcaklığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.
83	Niu vd. (2014), [102]	ABD	S D		Sistemin çalışmadığı zamanlarda, toprağın kendi özelliklerini yenileyebilme kabiliyetini analiz etmek için topraktan havaya ısı değiştiricilerinin sürekli ve kesikli çalışma performansları incelenmiştir. Borunun girişinden eksenel doğrultuda uzaklaştıkça, toprak sıcaklığının artmasıyla, toprağın yenilenme kabiliyetinin giderek azaldığı belirtilmiştir.
84	Xiong vd. (2014), [103]	ABD	S		Yatay toprak kaynaklı ısı pompa sistemlerden biri olan slinky (sarmal) modelin geliştirilmesi ve doğrulanması üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışma yatay bir sistem üzerinde yapılmış olmasına karşın dikey kuyularda kullanılan yaklaşımlar kullanılmıştır.
85	Yang vd. (2014), [45]	Çin		S D	Kaynak ısı değiştirici çevresindeki toprağın donmasıyla ilgili sayısal çalışma yapılmıştır. Bunun için 24 saatlik çalışma içerisinde meydana gelen faz değişimlerini dikkate alan iki boyutlu bir ısı transfer modeli geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda toprağın bulundurduğu su miktarını artırmanın toprağın soğuma hızıyla ilişkili olduğu ve artırıldığında toprağın daha yavaş soğuduğu belirlenmiştir.
86	Neuberger vd. (2014), [104]	Çek Cumhuriyeti	S D		Toprak bünyesindeki spesifik termal enerji rejimi ve spesifik ısı akışı analizi hassas ölçümlerle karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek yoğunluktaki antifiriz karışımının toprağa atılan ısı akışı üzerinde olumsuz etki yaptığı belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Toprak kaynaklı ısı pompalarıyla ilgili bu zamana kadar gerçekleştirilen kritik deneysel ve sayısal çalışmalar (devamı)

87	Sebarchievici ve Sarbu (2015), [105]	Romanya		S D	TKIP'larının performanslarını test etmek için farklı çalışma şartlarında deneysel ölçümler yapılmıştır. Bir aylık çalışma süresi için ana performans parametreleri klasik ve optimize edilmiş TKIP kullanılarak elde edilmiş ve performans değerlerinin kıyaslamalı analizi yapılmıştır. TRNYS adlı program kullanılarak ısıtmada enerji tüketimi, soğutma ve sıcak su operasyonlarının iki simülasyon modeli geliştirilmiştir.
88	Ouzzane vd. (2015), [106]	Kanada	S	S	Termal cevap testinden (TRT) elde edilen veriler kullanılarak bozulmamış toprak sıcaklığı için iki korelasyon geliştirilmiştir. Birinci korelasyon en küçük kareler yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen korelasyon çevre sıcaklığının, rüzgar hızının, yatay yüzey ve gökyüzü sıcaklığı (sky temperature) üzerindeki global solar randyasonun fonksiyonudur. Birinci korelasyon kullanılarak çevre sıcaklığının bozulmamış toprak sıcaklığı üzerinde baskın bir parametre olduğu gösterilmiştir.
89	Selamat ve Miyara (2015), [107]	Japonya	S		Mevsimsel değişimlerin yatay sarmal TID'lerinin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nümerik model oluşturularak çeşitli analizler yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre yatay ısı değiştiricilerinde ısı akışının dikey eksende daha baskın olduğu belirtilmiştir.
90	Adamovsky vd. (2015), [65]	Çek Cumhuriyeti	S		Lineer yatay ısı değiştiricileri ve sarmal yatay ısı değiştiricileri toprak sıcaklığına etkileri bakımından karşılaştırılmış ve çeşitli çıkarımlar yapılmıştır. Topraktan transfer edilen spesifik ısı miktarının lineer ısı değiştiricilerde sarmal tiplere göre önemli miktarda düşük olduğu belirtilmiştir.
91	Bottarelli (2015), [108]	İtalya	D S		Düz panel olarak adlandırılan özgün tip yatay TID'sinin davranışını incelemek için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sistem davranışı 2011 yazı boyunca sürekli ve kesikli çalışma modunda test edilmiştir.

D: Deneysel**, S:** Sayısal**, TKYIP:** Toprak Kaynaklı Yatay Isı Pompası**, TKDIP:** Toprak Kaynaklı Dikey Isı Pompası.

BÖLÜM 4

SAYISAL ÇALIŞMALAR

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin toprak içerisindeki sıcaklık dağılımını bulmak için literatürde birçok model önerilmiştir. Toprak ısı değiştiricilerinde kütle geçişi ihmal edilip ısı geçişinin belirlenmesi noktasında en genel haliyle üç boyutlu ve zamana bağlı ısı iletim denklemleri kullanılmaktadır. Isı üretimi yok iken toprak ısı değiştiricisi ve yakın çevresindeki sıcaklık dağılımının elde edilmesi için sınır koşulları doğru belirlenerek Eşitlik (4.1)'nin çözülmesi gerekmektedir.

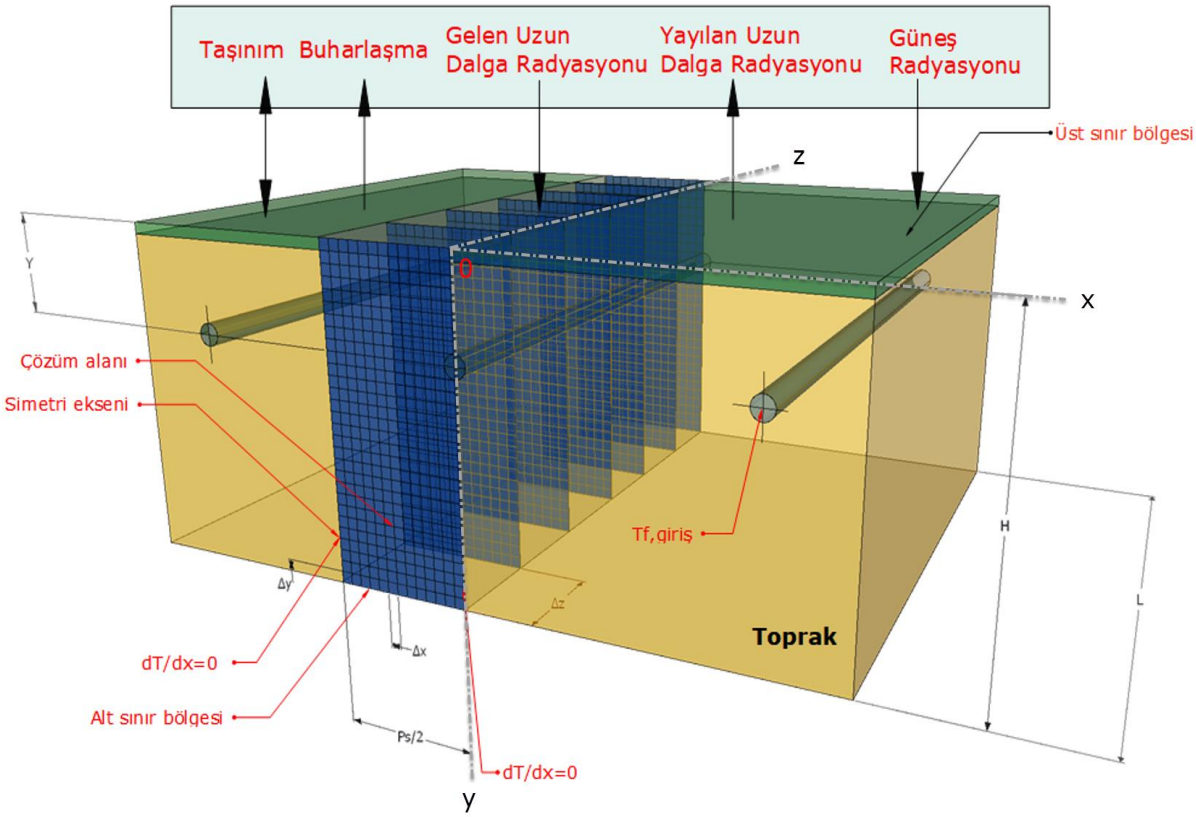
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.1}$$

Birbirlerinden belirli uzaklıkta olan paralel borular toprağa yerleştirilmiş olup bir kolektöre bağlanmışlardır. Toprağa yerleştirilen paralel borular arasında borular arası mesafeye bağlı olarak ısı etkileşimleri söz konusu olmaktadır. Şekil 4.1'de geliştirilen modelin toprak içinde ve yüzeyindeki çözüm bölgesi ve sınır koşulları görülmektedir.

4.1 Toprak Üst Yüzeyi Atmosfere Açık ve Borunun Toprağa Gömülmesi

4.1.1 Geliştirilen modelin kabulleri ve sınır şartları

Literatürdeki yapılan çalışmalar ve modellerde boru boyunca sıcaklığın çok fazla değişim göstermediği ve bundan dolayı çözümde başlangıçta 2 boyutlu çözülüp, sonrasında üçüncü boyuta geçilerek sınır şartlarının daha kolay uygulanmasında yardımcı olacaktır. Şekil 4.1'de çözüm bölgesi, simetri ekseni, toprak üst yüzeyinde yüzey-çevre etkileşimi, toprak alt sınır bölgesi, borunun gömme derinliği ve toprak simülasyon derinliği görülmektedir.



Şekil 4.1 Çözüm bölgesi ve sınır koşulları

Şekil 4.1'de görülen paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisinin çözümünün gerçekleştirilmesi için bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar şöyledir;

- Boru içinden geçen akışkanın sıcaklığı boru eksenine dik bir kesitte her noktada aynı alınmıştır.
- Gidiş ve dönüş kolektörlerinin çözüm bölgesine etkisi dikkate alınmamıştır.
- Toprağa gömülü borular aynı derinlikte olduğu kabul edilmiştir.
- Paralel borular içerisindeki debilerin aynı olduğu kabul edilmiştir.
- Toprağın ve boru malzemesinin termofiziksel özellikleri her noktada aynıdır.
- Topraktaki kütle geçişi ihmal edilmiştir.

Şekil 4.1'de verilen topraktaki çözüm alanında paralel boruların uzunluğu L, boruların gömme derinliği Y ve borular arası mesafe P_s olarak gösterilmiştir. Zamana bağlı iki boyutlu ısı iletim denklemi ve simüle edilen modelin sınır şartları aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.2}$$

$$T_i = T(\mathrm{y},t), \qquad t=0 \tag{4.3}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=P_s/2} = 0 \tag{4.4}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \tag{4.5}$$

$$\mathrm{q}\,(W/m^2), \quad y=H \tag{4.6}$$

$$\mathrm{q}_{üst}(W/m^2), \quad y=0 \tag{4.7}$$

(4.3) eşitliğinde başlangıç koşulu ve (4.7) eşitliğinde üst yüzeyde meydana gelen ısı transfer mekanizmaları ileride ayrıntılı olarak anlatılacaktır. (4.4) ve (4.5) eşitliğinde borular arası mesafenin yarısında simetri ekseni alındığından ve geometri tekrarlandığından dolayı bu şekilde alınmıştır. (4.5) eşitliğinde düşey yönde alınan simülasyon derinliğinde (y=H) ısı akısının bilinmesi çözümde bize oldukça kolaylık sağlayacaktır. Toprakta dikey yönde simülasyon derinliğini çok fazla aldığımızda (H=20 m gibi) ısı akısının olmayacağı yani q=0 kabulü yapılabilmektedir.

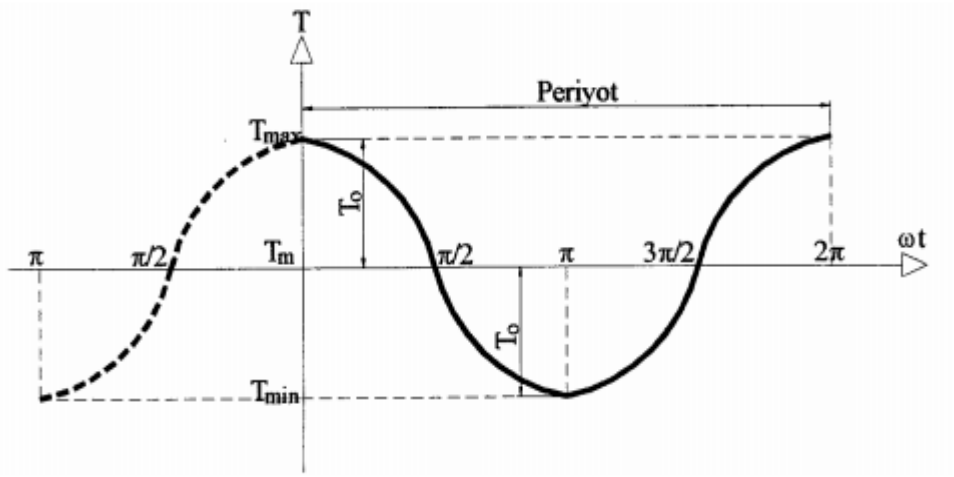
4.1.2 Zamana ve derinliğe göre toprak sıcaklığının hesaplanması

Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı olarak değişiminin belirlenmesi için deneysel ölçüm yapan meteorolojiden toprak yüzey sıcaklığının ya da literatürdeki bazı çalışmalarda hava sıcaklıkları kayıtlarından elde edilebileceği bilinmektedir. Her iki durumda da belirlenen toprak sıcaklıklarının yaz ortasında bir maksimum ve kış ortasında bir minimum değerleri dikkate alınarak ve zamana bağlı olarak sıcaklığın değişiminin yaklaşık sinüs veya kosinüs dalgalanmaları gibi gerçekleşmekte olduğu önceki çalışmalardan bilinmektedir (Şekil 4.2). Özetle, belirli bir derinlikte toprak sıcaklığının zamanla periyodik olarak değiştiği kabulü yapılabilmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, matematiksel olarak toprak yüzey sıcaklığının değişiminin Eşitlik (4.8)'de denklemsel ifadesi verilmiştir.

$$T(0,t) = T_{t,ort} + T_{t,gen}\cos(\omega t) \tag{4.8}$$

Bu denklemde;

$T_{t,ort}$: Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı (°C),
$T_{t,gen}$: Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği (°C),
ω: Açısal hız (rad)
t: Zaman (s)'dır



Şekil 4.2 Öngörülen toprak yüzey sıcaklığı değişimi

Kartezyen koordinatlarda ısı iletim denkleminin sadece zamana ve derinliğe bağlı olarak değişiminin denklemi Eşitlik (4.9)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.9}$$

Toprak yüzeyinden derinlere doğru inildikçe toprak sıcaklığının değişiminin azaldığı yani her derinlikte farklı $T_{t,gen}$ değerinin olacağı bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında toprak sıcaklık değişiminin derinlikle nasıl değiştiği üzerine çalışmalar yapılmış ve Eşitlik (4.8) ve (4.9) beraber çözülerek derinliğe ve zamana bağlı olarak toprak sıcaklığı değişiminin Eşitlik (4.10)'deki gibi olacağı önerilmiştir [109].

$$T(\mathrm{Y},t) = T_{\mathrm{t,ort}} + T_{\mathrm{t,gen}} e^{-Y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_s P}}} \cos\left(2\pi\frac{t}{P} - Y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}}\right) \tag{4.10}$$

Bu denklemde;

$T_{t,ort}$: Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı (°C),
$T_{t,gen}$: Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği (°C),
Y: Gömme derinliği (m),
t: Periyot başlangıcından itibaren süre (s),
P: Periyot (s),

α_t: Toprağın ısıl yayıcılığı (m^2/s)'dir.

Eşitlik (4.10)'da görüldüğü üzere hesaplaması yapılacak bölgenin ortalama toprak sıcaklığı ve genliği, derinlik ve zamana bağlı olarak toprağın herhangi bir noktasında sıcaklığın değişimi elde edilebilmektedir. Belirli derinlikten sonra toprak sıcaklığının genliği sıfıra eşit olduğu ve ortalama toprak sıcaklığının da sabit kaldığı söylenebilmekte yani toprak sıcaklığı yakın çevre dış etkenlerinden etkilenmeme durumu söz konusu olmaktadır. Meteorolojiden tetkik edilen bölge için sadece yüzeydeki toprak sıcaklığı değişim verilerinin alınmasıyla toprak yüzeyinden aşağıya doğru istenen derinliklerde ve zamanlarda, Eşitlik (4.10) kullanılarak topraktaki derinliğe göre sıcaklığı dağılımı hesaplanabilmektedir. Sayısal çalışmalar kapsamında, İstanbul'daki Göztepe istasyonundan alınan meteorolojik verilerden $T_{t,ort}$ =15.85 ^oC, $T_{t,gen}$=10.4 ^oC ve periyot başlangıcı 24 Temmuz olduğu belirlenmiştir.

4.1.3 Toprak yüzeyindeki enerji dengesi

Toprak üst yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının elde edilmesi, geliştirilen modelde toprak sıcaklığının belirlenmesinde oldukça önem arz etmektedir. Yüzeyde taşınımla olan duyulur ısı akısı, buharlaşmayla oluşan gizli ısı akısı, yağış nedeniyle oluşan ısı akısı, kar örtüsünden geçen iletimle ısı akısı, gelen güneş radyasyon ısı akısı, gelen ve yayılan uzun dalga radyasyon ısı akısı meydana gelmektedir. Yüzeyde meydana gelen ısı akılarının yüzeyin toprak, beton ve çim olma durumlarında veya geometrisindeki farklılıkların, modeldeki toprak üst yüzey enerji dengesi hesaplamalarında oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, yüzeyde meydana gelen bu ısı akılarının hesaplanmasında oldukça detaylı meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Toprak yüzeyinde meydana gelen enerji dengesi şöyledir [110-111]:

$$\dot{q}_t = \dot{q}_h + \dot{q}_e + \dot{q}_{ir} + \dot{q}_{er} + \dot{q}_s + \dot{q}_c + \dot{q}_p \qquad (4.11)$$

$\dot{q}_h$: Taşınımla meydana gelen duyulur ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_e$: Buharlaşma ile meydana gelen gizli ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_{ir}$: Işınımla yüzeyden yayılan ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_{er}$: Işınımla yüzeye gelen ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_s$: Güneş ışınımıyla yüzeye gelen ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_c$: Kar örtüsünden geçen iletimle ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_p$: Yağış olma durumunda meydana gelen ısı akısı (W/m^2)

$\dot{q}_t$: Toplam ısı akısı (W/m^2)

4.1.3.1 Kar örtüsünden dolayı yüzeyde meydana gelen ısı akısı

Yüzey kar örtüsüyle kaplandığında toprak üst tabakasından iletimle geçen ısı akısı şöyle tanımlanmıştır [110-111]:

$$\dot{q}_c = -(T_y - T_{t,a})\left(\frac{z_{kar}}{k_{kar}} + \frac{z_{t,u}}{k_{t,u}}\right)^{-1} \tag{4.12}$$

Bu denklemde;

$T_{t,a}$: Toprak üst tabakasının altındaki sıcaklık (K);
z_{kar}: Kar tabakasının kalınlığı (m);
k_{kar}: Kar tabakasının ısıl iletkenliği(W/m K);
$z_{t,u}$: Toprak üst tabakasının kalınlığı (m);
$k_{t,u}$: Toprak üst tabakasının ısıl iletkenliği(W/m K)'dir.

Yüzeyde kar örtüsü olduğunda, yüzeyde meydana gelen diğer ısı akıları için geliştirilen denklemler kullanılamayacağından yeniden bu durum için geliştirilmelidir.

4.1.3.2 Buharlaşmadan dolayı yüzeyde meydana gelen ısı akısı

Yüzeyde meydana gelen buharlaşma, yüzeyin kar tabakasıyla kaplı olması veya olmaması durumlarında incelenmiştir. Kar tabakasıyla kaplı olma durumunda buharlaşmadan dolayı yüzeyde meydana gelen gizli ısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [110-111]:

$$\dot{q}_e = \rho_a L_s D_e \zeta \left(0.622 \frac{e_a - e_y}{P_a}\right) \tag{4.13}$$

$$D_e = \frac{\kappa^2 U_z}{\left[\ln(z/z_0)\right]^2} \tag{4.14}$$

$$\zeta = \frac{1}{(1+10Ri)} \tag{4.15}$$

$$Ri = \frac{gz(T_a - T_y)}{T_a U_z{}^2} \tag{4.16}$$

$$\log_{10} e_a = 11.40 - \frac{2353}{T_{dp}} \tag{4.17}$$

L_s: Kar örtüsünün süblimasyon gizli ısısı (J/kg),
D_e: Gizli ısı değişim katsayısı (m/s),
ζ: Kararlılık fonksiyonu,
T_a: Hava sıcaklığı (K),
T_y: Toprak veya kar örtüsünün üst yüzey sıcaklığı (K),
κ: Von Karman sabiti,
U_z: Yüzeyden z kadar yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s),
z: Referans yüksekliği (m),
z_0: Pürüz yüksekliği (m),
Ri: Richardson sayısı,
e_h: Kısmi buhar basıncı (Pa),
e_y: Yüzeydeki doymuş buhar basıncı (Pa),
T_{dp}: Günlük çiğ noktası sıcaklığı (K)'dır.

Yüzeyde kar tabakası olmaması durumunda yani toprak yüzeyindeki buhar basıncı ile hava basıncı arasında meydana gelen gizli ısı akısının denklemi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\dot{q}_e = 0.0168\, f h_a \left[P_s - P_a\right] \tag{4.18}$$

Bu denklemde;

f: Yüzey örtüsü ve toprak nemine bağlı bir katsayı,
h_a: Taşınım ısı geçişi katsayısı (W/m^2 K),
P_s: Yüzeyin buhar basıncı (Pa)
P_a: Havanın buhar basıncı (Pa)'dır.

Toprak yüzey örtüsüne göre f katsayısı değişkenlik göstermekte ve literatürde kuru toprak için f=0.4-0.5, çorak toprak için f=0.1-0.2, doymuş toprak için f=1 ve nemli toprak için f=0.6-0.8 alınabilir. Toprak yüzeyinin bitki örtüsüyle kaplı olması durumunda literatürde yukarıdaki değerlerin 0.7 ile çarpılması söylenmektedir.

4.1.3.3 Taşınımla meydana gelen ısı akısı

Toprak yüzeyinde meydana gelen duyulur ısı akısının eşitliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir[110-111]:

$$\dot{q}_h = \rho_a C_{p,a} D_h \zeta (T_a - T_y) \tag{4.19}$$

$$D_h = \frac{\kappa^2 U_z}{\left[\ln(z / z_0)\right]^2} \tag{4.20}$$

$$\zeta = \frac{1}{(1+10Ri)} \tag{4.21}$$

$$Ri = \frac{gz(T_a - T_y)}{T_a U_z^{\,2}} \tag{4.22}$$

Burada;

C_p: Havanın sabit basınçta özgül ısısı (J/kg K),

D_h: Duyulur ısı değişim katsayısı (m/s)'dır.

4.1.3.4 Işınımla yüzeyden yayılan ve yüzeye gelen ısı akıları

Işınımla yüzeye gelen ısı akısı literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda deneye dayalı bir eşitlik olarak verilmiştir.

$$\dot{q}_{ir} = 1.08(1-\exp\left(-(0.01e_a)^{\frac{T_a}{2016}}\right)\sigma T_a^4 \tag{4.23}$$

Işınımla toprak üst yüzeyinden yayılan ısı akısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\dot{q}_{er} = -\varepsilon\sigma T_y^4 \tag{4.24}$$

4.1.3.5 Güneş ışınımıyla yüzeye gelen ısı akısı

Toprak üst yüzeyine kısa dalga güneş ışınımıyla gelen ısı akısı literatürde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$q_s = b\{\mathrm{S}_{\mathrm{ort}} + S_{gen}\,\mathrm{Re}(\exp(i\omega t + \phi_1)\} \tag{4.25}$$

$$b = 1 - albedo \tag{4.26}$$

Bu denklemde;

S_{ort}: Yüzeydeki ortalama yıllık gelen güneş enerjisi (W/m^2),
S_{gen}: Yıllık güneş radyasyonundaki salınımın genliği (W/m^2),
ϕ_1: Faz farkı (rad)
b: Toprak yüzeyinin yutuculuğu ve aydınlatılmasına bağlı bir katsayı
albedo: Toprak yüzeyinin yansıtıcılığı ile ilgili bir katsayısı'dır.

Yukarıda yüzeye gelen kısa dalga güneş ışınımının hesabının yanında, güneşin ne zaman doğduğu ve battığı da oldukça önem arz etmektedir. Gün uzunluğu yani güneşin doğuşuyla batışı arasındaki sürenin yıl boyunca hesaplanması için birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda istenen bölgenin gün uzunluğunun belirlenmesi için enlem, boylam, zaman dilimi ve deniz seviyesinden yüksekliğinin bilinmesi gereklidir. Güneş doğuşu ve batışı arasındaki fark yani gün uzunluğu aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır [110-111].

$$GD = Z - U \tag{4.27}$$

$$GB = Z + U \tag{4.28}$$

$$Z = 12 + \frac{R - L_b}{15} + \frac{T}{60} \tag{4.29}$$

$$U = \frac{1}{15}\arccos\left(\frac{[\sin(-0.833 - 0.0347(\mathrm{H_y})^{0.5})] - \sin D \sin B}{\cos D \cos B}\right) \tag{4.30}$$

$$T = 3.98892[(\varepsilon - \beta) + (\lambda - v)] \tag{4.31}$$

$$\lambda = 0.985653*(N - 2) \tag{4.32}$$

$$v = \lambda + 1.915169 \sin \lambda \tag{4.33}$$

$$\varepsilon = 0.985653*(\mathrm{N} - 80) \tag{4.34}$$

$$\beta = \arctan(0.917408 \tan \varepsilon) \tag{4.35}$$

$$D = \arcsin(0.398 \sin(v - 78.75) \tag{4.36}$$

Bu denklemlerde;

GD: Güneşin doğuşu (saat dakika),
GB: Güneşin batışı (saat dakika),
B: Bölgenin enlemi,
L_b: Bölgenin boylamı,
R: Referans boylam (Zaman dilimi*15),
H_y: Deniz seviyesinden yükseklik (m),
D: Güneşin eğim açısı,
T: Zaman eşitliği'dir.

4.1.3.6 Yağış olma durumunda meydana gelen ısı akısı

Yıl boyunca yağış olma durumunda toprak yüzeyinde meydana gelen ısı akısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Denklemde yağış yoğunluğu ifadesi birim metrekareye gelen yağış miktarı olup yağmur sıcaklığı yaklaşık olarak hava sıcaklığına eşit olduğu söylenmiştir.

$$q_p = I_R C_{P,s}(\mathrm{T_h} - \mathrm{T_y}) \tag{4.37}$$

Bu denklemde;

I_R: Yağış yoğunluğu (kg/m^2 s),
C_{Ps}: Suyun özgül ısısı (J/kg K)'dır

4.1.4 Akışkan sıcaklığının boru boyunca değişiminin incelenmesi

Borunun girişinde akışkan ile toprak arasında sıcaklık farkı fazla olurken, borunun çıkışına doğru boru boyunca gittikçe akışkan ile toprak arasında sıcaklık farkı az olur. Bundan dolayı, borunun girişinde akışkan ile toprak arasındaki ısı transferi yüksek, borunun çıkışına doğru boru boyunca gittikçe akışkan ile toprak arasındaki ısı transferi daha azdır. Boru içerisinde enerjinin korunumu yazılarak akışkan giriş sıcaklığının boru boyunca değişimi elde edilebilmektedir (Şekil 4.3).

$$mCp_f dT_f = qdl \tag{4.38}$$

Isıtma sezonu referans alındığında akışkan sıcaklığında artma toprak sıcaklığında azalmaya sebep olmaktadır. Yani,

$$T = T_s - T_f \Rightarrow dT = -dT_f \tag{4.39}$$

Toprak ile akışkan arasında birim boydan geçen ısı miktarı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$q = k_s (T_s - T_f) F(\mathrm{z}) = k_s T F(\mathrm{z}) \tag{4.40}$$

Eşitlik (4.40)'da elde edilen ifade, Eşitlik (4.38)'de yerine yazıldığında;

$$\frac{k_s T F(\mathrm{z})}{mCp_f} dl = -dT \tag{4.41}$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki denklemler düzenlenirse Eşitlik (4.42) ve integre edilirse aşağıdaki ifade Eşitlik (4.43)'deki gibi elde edilir.

$$\int_{T_{f,i}}^{T_{f,o}} -\frac{dT}{T} = \frac{k_s F(\mathrm{z})}{mCp_f} \int_0^L dl \tag{4.42}$$

$$T_{f,o} = T_s - (T_s - T_{f,i}) e^{\frac{k_s F(\mathrm{z}) \mathrm{L}}{mCp_f}} \tag{4.43}$$

$$z = \frac{\alpha t}{r^2} \tag{4.44}$$

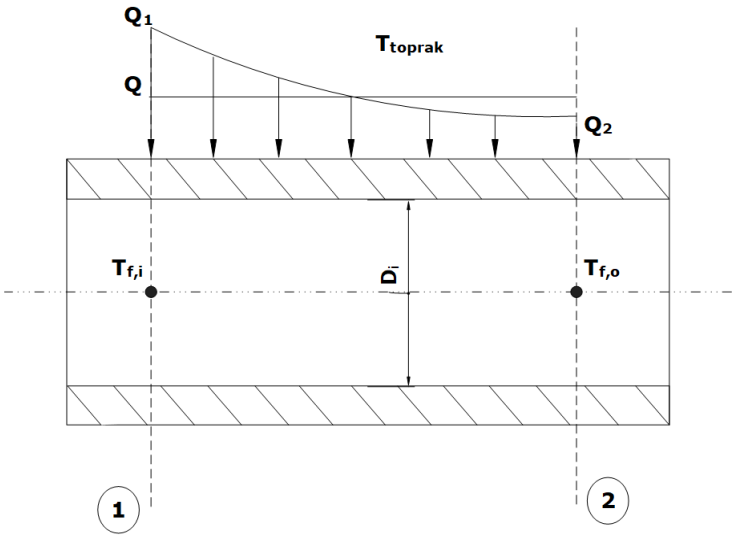
$$F(\mathrm{z}) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-z\beta^2}}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} \frac{d\beta}{\beta} \tag{4.45}$$

Bu denklemlerde;

$T_{f,o}$: Akışkanın çıkış sıcaklığı (°C),
$T_{f,i}$: Akışkanın giriş sıcaklığı (°C),
T_s: Toprak sıcaklığı (°C),
L: Boru boyu (m),
k_s: Toprağın ısıl iletkenliği (W/m K),
m: Akışkanın kütlesel debisi (kg/s),
$Cp_{,f}$: Akışkanın özgül ısısı (J/kg K),
β: İntegral değişkeni'dir.

F(z) ifadesi toprağın zamanla körleşmesinden dolayı, topraktan birim boyda çekilen ya da toprağa aktarılan ısıdaki düşüşü öngörmektedir. Eşitlik 4.43'te F(z) ifadesi dikkate alınmadığında, Eşitlik (4.46) aşağıdaki gibi olacaktır.

$$T_{f,o} = T_s - (T_s - T_{f,i})e^{\frac{k_s \mathrm{L}}{mCp_f}} \tag{4.46}$$



Şekil 4. 3 Boru içindeki ısı transferinin değişimi

Boru boyunca akışkan sıcaklığının değişimini bulmak için borudan dl uzunluğunda bir parça alınarak, bu parçadaki akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları bulunur. Bu parçanın akışkan çıkış sıcaklığı, bir sonraki parçanın akışkan giriş sıcaklığı olmaktadır. Bu sayede, sadece x ve y ekseninde iki boyutlu olarak incelenen çözüm alanıi, z ekseni boyunca ardı ardına birçok çözüm bölgesi yaratarak üç boyutlu hale getirilir. Boru içindeki akışkan ile toprak arasında ısı transferinin değişimi Şekil 4.3'de görülmektedir.

4.1.5 Problemin sonlu farklar yöntemiyle çözümü

Problemin çözümünde geçerli sınır şartları ve denklemlerin karmaşıklığından dolayı analitik bir çözüm yaklaşımı yapılamamaktadır. Sayısal çözüm yöntemleri incelendiğinde

başlıca iki yöntem bulunmakta olup, bunlar sonlu farklar ve sonlu elemanlar yaklaşımıdır. Sonlu elemanlar yaklaşımının başlıca avantajı, karmaşık geometrilerde oldukça kolaylık sağlaması iken, dezavantajı ise, karmaşık notasyonları olması ve daha büyük bilgisayar kapasitesi gerektirmesidir. Sonlu farklar yaklaşımı ise, kısmı diferansiyel denklemlerin çözümleri için oldukça kolaylık sağlamaktadır. Yukarıda söz konusu olan yaklaşımların avantajları ve dezavantajları dikkate alındığında, problemin çözümünde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

4.1.5.1 Zamana bağlı iki boyutlu ısı iletimi ve ADI yöntemi

Literatür incelendiğinde zamana bağlı ısı iletim denklemlerinin çözümünde Crank-Nicholson, açık, kapalı veya birleşik yöntemleri gibi metotlar kullanılmıştır. Ancak, bu yöntemler sistemin çözümlenmesinde kararlı bir yapı elde etmek için kullanıldığında zaman adımı çok küçük olacağından gereken süre oldukça uzun olacaktır. Literatür incelendiğinde zaman adımının daha büyük seçilebileceği ve ızgara aralığının da kararlı bir yapıda olduğu yöntem Değişken Yön Kapalı yöntemi (ADI)'dir. ADI yönteminde elde edilen matris sistemi tridiagonal matris olup, çözümünde ise Thomas algoritması kullanılarak sonuca ulaşılabilmektedir. ADI yönteminin diğer avantajı, boyutları büyük tek matris yerine boyutları daha küçük matrisler oluşturup onların tekrarla çözülmesidir. Bu durum, daha az işlem ve hafıza gerektirdiğinden büyük sistemlerde özellikle düğüm (node) sayısı fazla olan durumlarda oldukça avantaj sağlamaktadır.

Eşitlik (4.2)'de verilen 2 boyutlu ve zamana bağlı ısı iletim denklemini ADI yaklaşımı kullanarak çözüme ulaşmak için;

$$T(x,y,t) = T(\mathrm{i}\,\Delta x, \mathrm{j}\,\Delta y, \mathrm{n}\,\Delta t) \equiv \mathrm{T}_{i,j}^{n} \tag{4.47}$$

Eşitlik (4.47)'de gösterilmiştir. ADI yönteminin çözüm yaklaşımını ele alırsak; n zamanından n+1 zamanına geçişte yönlerden birini kapalı formülasyon yaparken diğeri açık formülasyon uygulanarak kullanılır. Örneğin, n zamanından n+1 zamanına geçişte x yönü kapalı formülasyon, y yönü açık formülasyon olurken diğer zaman adımında ise yani n+1 zamanından n+2 zamanına geçişte y yönü kapalı formülasyon iken x yönü açık formülasyon şeklinde çözüm sağlamaktadır. Bu şekilde yönlerin her bir zaman adımında

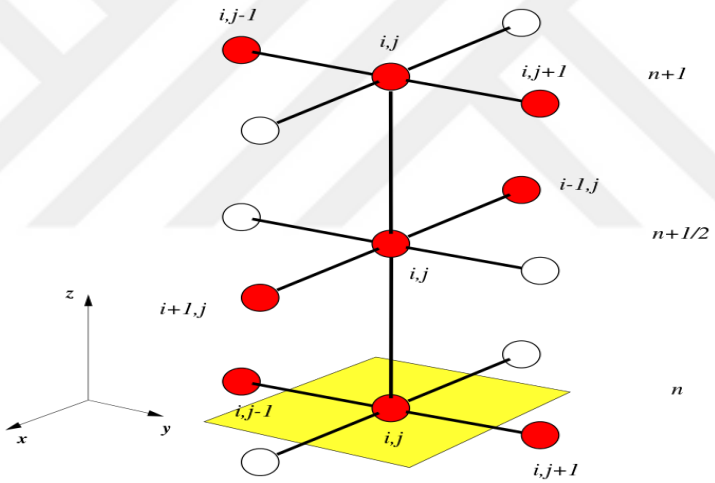
değiştirilmesiyle ile çözülür ve sonunda istenilen N zamanına ulaşılır. Şekil 4.4'te ADI yaklaşımının daha iyi anlaşılması için şematik gösterimi verilmiştir.

n zamanından n+1 zamanına geçişte x yönü kapalı formülasyon, y yönü için açık formülasyon kullanılarak yazılırsa Eşitlik (4.48) elde edilir [112].

$$\frac{T_{i,j}^{\,n+1}-T_{i,j}^{\,n}}{\alpha.\Delta t}=\frac{T_{i-1,j}^{\,n+1}-2.T_{i,j}^{\,n+1}+T_{i+1,j}^{\,n+1}}{(\Delta x)^2}+\frac{T_{i,j-1}^{\,n}-2.T_{i,j}^{\,n}+T_{i,j+1}^{\,n}}{(\Delta y)^2} \tag{4.48}$$

Bir sonraki adımda n+1 zamanından n+2 zamanına geçişte y yönü kapalı formülasyon iken x yönü açık formülasyon olacaktır. Bu da Eşitlik (4.49)'da verilmiştir.

$$\frac{T_{i,j}^{\,n+2}-T_{i,j}^{\,n+1}}{\alpha.\Delta t}=\frac{T_{i-1,j}^{\,n+1}-2.T_{i,j}^{\,n+1}+T_{i+1,j}^{\,n+1}}{(\Delta x)^2}+\frac{T_{i,j-1}^{\,n+2}-2.T_{i,j}^{\,n+2}+T_{i,j+1}^{\,n+2}}{(\Delta y)^2} \tag{4.49}$$



Şekil 4. 4 ADI Yaklaşımı

Çözüm gerçekleştirilirken n zamanında bulunan sıcaklıklar, n+1 zamanındaki sıcaklıkların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Eşitlik (4.48) ve (4.49)'deki ifadeler daha kullanılışlı olacak şekilde literatürde düzenlenmiş yani bilinenler bir tarafa bilinmeyenler bir tarafa alınarak aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$-r.T_{i-1,j}^{\,n+1}+(1+2r).T_{i,j}^{\,n+1}-r.T_{i+1,j}^{\,n+1}=r.T_{i,j-1}^{\,n}+(1-2r).T_{i,j}^{\,n}+r.T_{i,j+1}^{\,n} \tag{4.50}$$

$$-r.T_{i,j-1}^{\,n+2}+(1+2r).T_{i,j}^{\,n+2}-r.T_{i,j+1}^{\,n+2}=r.T_{i-1,j}^{\,n+1}+(1-2r).T_{i,j}^{\,n+1}+r.T_{i+1,j}^{\,n+1} \tag{4.51}$$

Eşitlik (4.50) ve (4.51)'deki r değeri, eğer x ve y yönünde eşit aralıklar alınırsa aşağıdaki gibi olmaktadır. Bizim çözümlerimizde eşit alınmıştır. MATLAB'da yazılan kod sayesinde verilen zamanı çözene kadar yukarıdaki denklemler tekrarlanarak uygulanır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı tridiagonal olmasıdır. Tridiagonal matris sistemi çözümü için en uygun yöntem ise Thomas Algoritmasıdır.

$$r = \frac{\alpha.\Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{\alpha.\Delta t}{(\Delta y)^2} \tag{4.52}$$

Denklemin çözüme ulaşabilmesi için sınır şartlarının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Sınır koşullarının sonlu fark kullanılarak ifade edilmiş şekli aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dT}{dx} = 0 \;\Rightarrow\; T_{i-1,j} = T_{i+1,j} \tag{4.53}$$

$$q = -k\frac{dT}{dx} \;\Rightarrow\; T_{i+1,j} = T_{i-1,j} - \frac{2q\Delta x}{k} \tag{4.54}$$

$$-k\frac{dT}{dx} = h(T_\infty - T) \;\Rightarrow\; T_{i-1,j} = T_{i+1,j} + \frac{2\Delta x h}{k}(T_\infty - T_{i,j}) \tag{4.55}$$

4.1.5.2 Thomas Algoritması

Thomas algoritması Gauss eliminasyon yönteminin üç kolonlu bir dikdörtgensel matris kullanılarak yapılan özel bir uygulamasıdır. Aşağıda N tane denklemin çözümünde kullanılacak Thomas Algoritması yani Tridiagonal matris algoritması görülmektedir [112].

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & a_{N-1} & b_{N-1} & c_{N-1} \\ & & & & a_N & b_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{N-1} \\ u_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ d_{N-1} \\ d_N \end{bmatrix}$$

Bu yaklaşım MATLAB veya FORTRAN gibi birçok bilgisayar programlama dilinde oldukça etkin kullanılan ve kararlı yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Çözümünde ise;

$$a_i u_{i-1} + b_i u_i + c_i u_{i+1} = d_i \tag{4.56}$$

$1 \le i \le R$ ve $a_1=c_R=0$ denklem sistemi dikkate alalım. Thomas algoritmasının çözümünü incelediğimizde;

$$P_i = b_i - \frac{a_i c_{i-1}}{P_{i-1}}, P_1 = b_1 \tag{4.57}$$

$$Q_i = \frac{d_i - a_i Q_{i-1}}{P_i}, \mathrm{Q}_1 = \frac{d_1}{b_1} \tag{4.58}$$

Yukarıdaki denklemler çözüldükten sonra bağımlı değişkenler aşağıdaki gibi elde edilir;

$$u_R = Q_R \quad \text{ve } u_i = Q_i - \frac{c_i u_{i+1}}{P_i} \tag{4.59}$$

4.1.6 MATLAB Programında Modelin Geliştirilmesi ve Çözümü

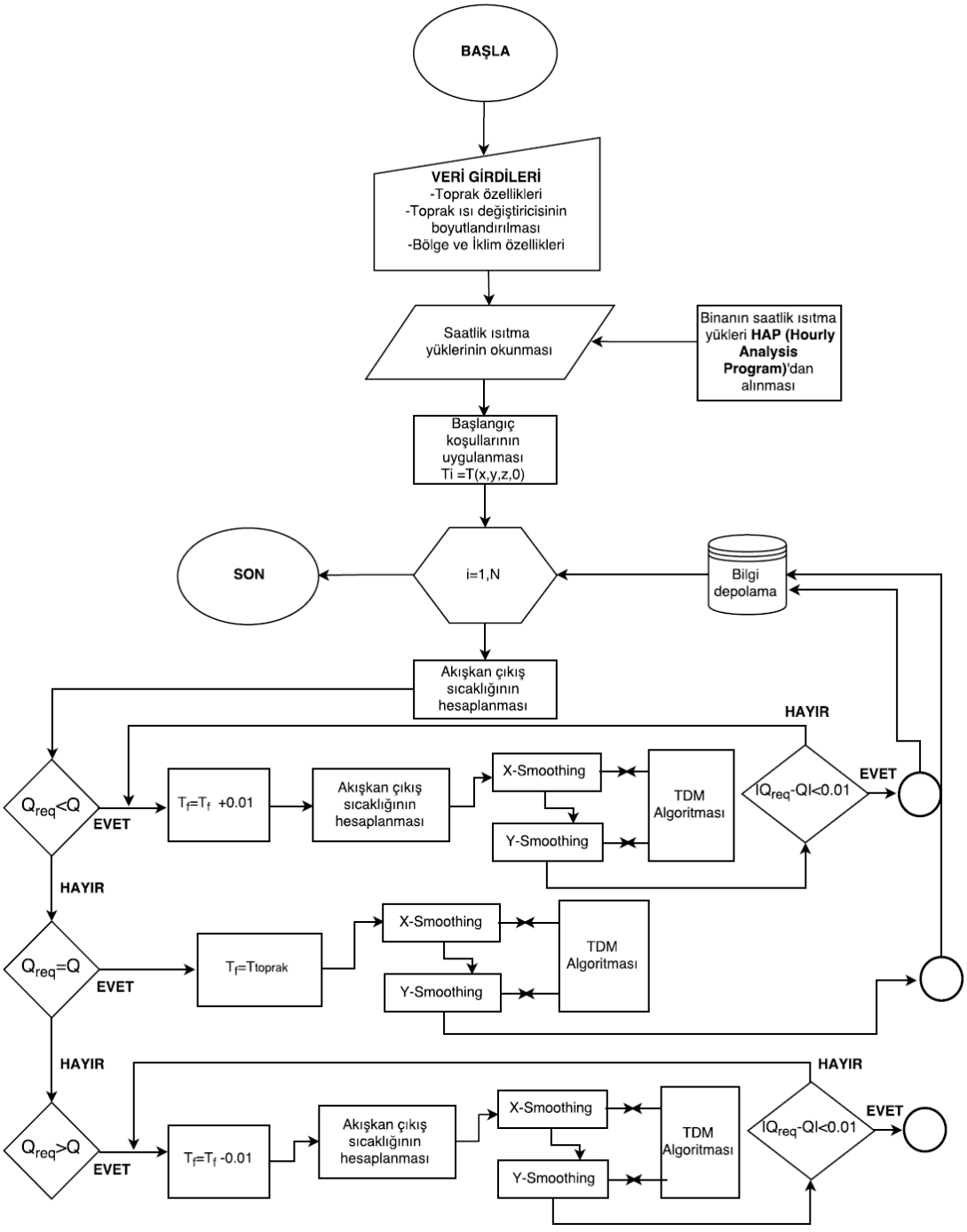
Toprak içerisindeki sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi için toprak yüzeyi ve içerisindeki ısı transfer mekanizmaları ve sınır şartları yukarıda verilen modelin, MATLAB programı kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Izgara aralıklarının boyutlandırılmasında x yönünde 0.1 m, y yönünde 0.1 m, z yönünde 1 m ve zaman adımı içinse 1800 s alınmıştır. Alınan bu ızgara boyutlarının ve zaman adımının sonuçlara etkisinin çok fazla olmadığı görülmüştür. Daha küçük ızgara aralıkları ve zaman adımı alındığında daha büyük matrisler ve daha fazla bilgisayar gücü gerektiğinden tercih edilmemiştir.

Model ilk olarak sadece ısıtma sezonunda yani Kasım-Nisan arası çalıştırılması diğer kalan zamanlarda toprak üzerinde herhangi bir işlem yapılmayacak şekilde simüle edilmiştir. Isıtma sezonu için birim boydan çekilen farklı ısı yüklerine (21, 10.5, 7 W/m) göre 10 yıllık periyotta simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

4.1.6.1 Isıtma Sezonu

İstanbul'da 200 $m^{2'}$lik bir ofisin ısıtma sezonunda süresince saatlik ısı ihtiyacı HAP (Hourly Analysis Program) programı kullanılarak belirlenmiş olup MATLAB'da geliştirilen kod sayesinde, ofisin ısıtma sezonunda her saat için gerekli ısı ihtiyacına karşılık gelen toprak içerisindeki borularda akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu 10 yıllık zaman diliminde simüle edilmiştir [113]. Şekil 4.1'de TID, sınır şartları ve ADI sonlu fark yaklaşımı için çözüm alanı görülmektedir. Gömme derinliği, borular arası mesafe ve yüzey

etkilerinin toprak sıcaklığı üzerindeki etkisi incelenmiş ve toprak şartlarında bu parametrelerin etkisinin ne olacağı değerlendirilmiştir. Akışkan giriş, çıkış sıcaklığı ve toprak sıcaklığının birim boydan çekilen farklı ısı yüklerine (21, 10.5, 7 W/m) göre 10 yıllık periyotta değişimi incelenmiştir. 10 yıllık simülasyonun 1'inci, 5'inci ve 10'uncu yıllarının başlangıç, orta ve bitişinde topraktaki yatay ve dikey sıcaklık dağılımının değişimi elde edilmiştir.



Şekil 4. 5 Blok Diyagram [113]

Geliştirilen MATLAB kodunun çözüm algoritmasının blok diyagramı Şekil 4.5'de gösterilmiştir. İlk olarak, gerekli girdi parametreleri belirlenerek başlangıç sınır koşulları uygulanır. Sonra ön tahmini yapılan akışkan giriş sıcaklığından, akışkan çıkış sıcaklığı ve buradan da topraktan çekilen ısı ($\dot{Q}$) belirlenir. Belirlenen Q değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) büyükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C arttırılır. Tersi durum söz konusu olduğunda yani belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) küçükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C azaltılır.

Sonuç olarak bu proses, binanın saatlik ısı yükü ile topraktan çekilen ısı yükü arasındaki fark 0.01 kW olana kadar tekrarlanır. Sistemin çalışmadığı zamanlarda ise yani $\dot{Q}_{req}$=0 olduğunda akışkan giriş sıcaklığı toprak sıcaklığına eşit alınmaktadır. Bunun sebebi, binanın ısı yükü ihtiyacı olmadığından, akışkan toprakta dolaşmayacak yani toprak kendi haline bırakılacaktır. Akışkan giriş sıcaklığı saatlik olarak bu proses sonrası belirlendikten sonra buradan akışkan çıkış sıcaklıkları ve toprak bölgesinde sıcaklık dağılımı elde edilir. Bu proses 10 yıllık periyotta her saat için tekrarlanır.

4.1.6.2 Isıtma ve Soğutma Sezonu

TID, TKIP sisteminin en kritik bileşenidir. Toprak sıcaklık profili, zamana ve bulunduğu alana göre değişen, aynı zamanda da TID'sinin boyutladırılması ve tasarımında kritk öneme sahiptir. Toprak sıcaklık profili, topraktan çekilen veya toprağa aktarılan ısı transfer oranının bir fonksiyonudur. TID'sinin boyutlandırılması ve seçimi ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, bu çalışmalarda ya meteorolojik verilerden elde edilen değişmemiş toprak sıcaklığı kullanılmakta ya da TKIP çalıştığında, yıllık toprak sıcaklık profilini temsil eden sürekli periyodik toprak sıcaklık profilini elde etmek noktasında uzun zamanlı çalıştırılmamaktadır. Bu da TID performansının, tahmin edilenlerden yüksek bulunmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durum, TKIP'nın mümkün olan en yüksek verimlilikte daha uzun çalışma periyotları için belirlenen tasarım gücünde çalışma düşüncesi net değildir. Bundan dolayı, sürekli periyodik şartların elde edilmesi, TKIP sisteminin tasarımında büyük öneme sahiptir. Buna ek olarak, TID'sinin gömülü olduğu toprağın depolama etkisi önemlidir. Bu çalışmada farklı parametrelerin toprak sıcaklık profili üzerindeki etkileri araştırılmış ve sürekli periyodik toprak sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen modelle, paralel borulu yatay TID'sinin termal

performansını doğru bir şekilde tahmin etmektir. Meteorolojik veriler, gerçekçi sınır şartları ve çalışma koşulları geliştirilen modele entegre edilerek, TID'sinin uzun zamanlı simülasyonunu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, öncelikle, İstanbul'da 200 m^2'lik bir ofisin ısıtma ve soğutma sezonu süresince saatlik ısıtma ve soğutma yükü ihtiyaçları HAP (Hourly Analysis Program) programı kullanılarak belirlenmiştir. MATLAB'da geliştirilen kod sayesinde, ofisin tüm yıl boyunca her saat için gerekli ısı ihtiyacına karşılık gelen akışkan giriş sıcaklığının optimizasyonu 10 yıllık zaman diliminde farklı simülasyonlar için yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında, TID'sinin tasarımına etki eden birçok parametreler örneğin; gömme derinliği, borular arası mesafe, paralel boru sayısı (NPT), boru uzunluğu ve çapı gibi parametreler kullanılmıştır.

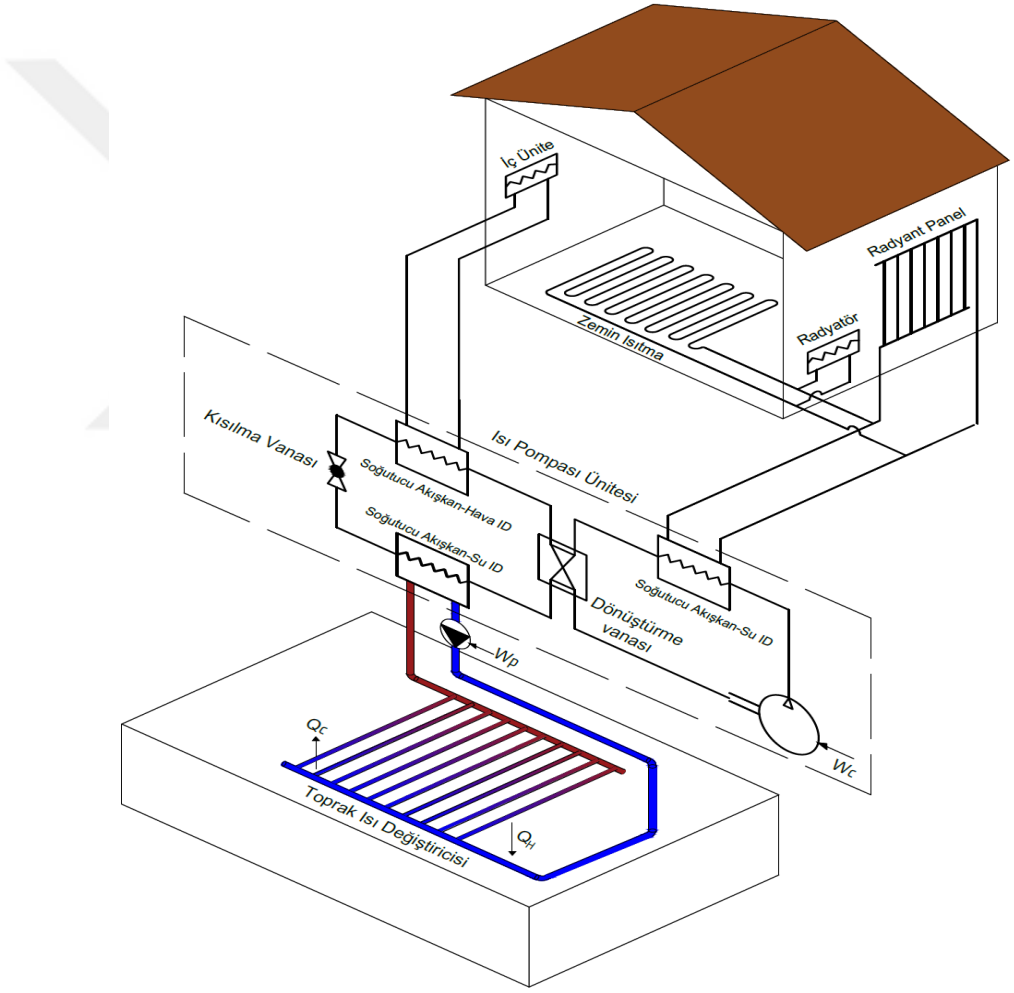
Sonrasında, MATLAB'ta geliştirilen yeni bir kodla, TKIP sisteminin saatlik enerji analizi gerçekleştirilerek anlık COP değerleri ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Elde edilen simülasyon verileri kullanarak, TKIP sisteminin yıllık işletme maliyeti on yıllık bir süre için belirlenmiştir. İlk yatırım ve işletme maliyetlerini kullanarak, bir optimizasyon parametresi olan referans fonksiyon tanımlanmıştır. Teknik ve ekonomik parametrelerin referans fonksiyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır [5].

4.1.6.2.1 Geliştirilen Modelin Tanıtımı

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, TKIP sisteminin yatay paralel borulu ısı değiştiricisi incelenmiştir. Toprakta zamana bağlı üç boyutlu-sıcaklık dağılımını çözmek için meteorolojik veriler kullanılarak gerçekçi sınır koşulları ile sayısal bir model önerilmiştir. Bununla birlikte, boru ekseni boyunca sıcaklık değişimi oldukça küçük olduğundan, boru ekseni boyunca toprağın içindeki ısı transferi ihmal edilmiştir. Böylece, topraktaki ısı iletim denklemleri, iki boyutlu (boru eksenine dik bir düzlemde) ve dinamik sınır koşulları dikkate alınarak çözülmüştür.

Şekil 4.1'de TID, sınır şartları ve ADI sonsuz fark yaklaşımı için çözüm alanı görülmektedir. Isıtma sezonunda kullanılan sınır şartları, yüzeyde meydana gelen ısı akıları, ADI sonlu fark yaklaşımı ve boru boyunca sıcaklığın değişim denklemleri bu bölümde de aynı olup yukarıda verilmiştir (Eşitlik (4.2-4.59)).

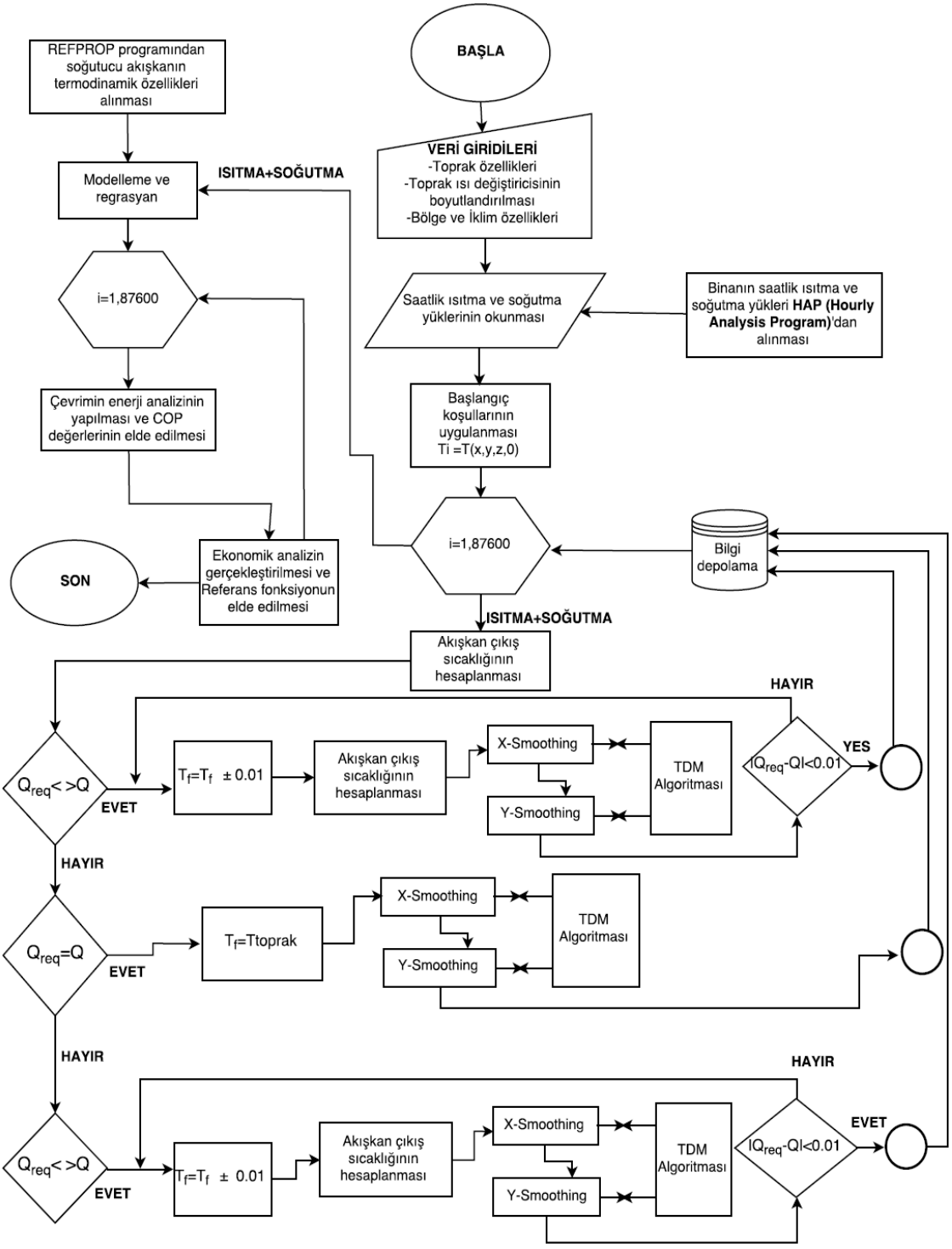
Geliştirilen MATLAB kodunun algoritmasının blok diyagramı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. İlk olarak, gerekli girdi parametreleri belirlenerek başlangıç sınır koşulları uygulanır. Sonra ön tahmini yapılan akışkan giriş sıcaklığından akışkan çıkış sıcaklığı ve buradan da topraktan çekilen ya da toprağa bırakılan ısı ($\dot{Q}$) hesaplanır. Isıtma sezonu için, belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) büyükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C arttırılır. Tersi durum söz konusu olduğunda yani belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) küçükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C azaltılır. Soğutma sezonu için, belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) büyükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C azaltılır.



Şekil 4. 6 TKIP sisteminin görünümü [5]

Tersi durum söz konusu olduğunda yani belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) küçükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C arttırılır. Sonuç olarak bu proses, binanın saatlik ısıtma veya soğutma ısı yükü ile topraktan çekilen ya da toprağa bırakılan

ısı yükü arasındaki fark 0.01 kW'tan az olana kadar tekrarlanır. Sistemin çalışmadığı zamanlarda ise yani $\dot{Q}_{req}$=0 olduğunda akışkan giriş sıcaklığı toprak sıcaklığına eşit alınmaktadır. Bunun sebebi, binanın ısıtma veya soğutma yükü ihtiyacı olmadığından, akışkan toprakta dolaşmayacak yani toprak kendi haline bırakılacaktır.



Şekil 4. 7 Blok Diyagram [5]

Toprak çözüm alanında akışkan giriş sıcaklığı saatlik olarak bu prosesin tekrarlanmasıyla belirlendikten sonra buradan akışkan çıkış sıcaklıkları ve toprak bölgesinde sıcaklık dağılımı elde edilir. Bu proses 10 yıllık periyotta her saat için tekrarlanır.

MATLAB'ta geliştirilen kod sayesinde, toprağa yerleştirilen borular etrafındaki saatlik toprak sıcaklıkları, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları 10 yıllık periyotta elde edilir. Sonrasında, MATLAB'ta geliştirilen yeni bir kod yardımıyla, bu sıcaklıklar girdi parametresi olarak verilip ısı pompası çevriminde enerji analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilen enerji analizi neticesinde farklı simülasyon çalışmaları için saatlik COP değerleri elde edilmiştir. Akabinde, ekonomik analiz yapılarak bir optimizasyon parametresi olan referans fonksiyon tanımlanmıştır. Tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilmiştir.

4.1.6.2.2 Ekonomik Analiz ve Referans Fonksiyon

İlk yatırım maliyetleri, özellikle kazı maliyetleri, TKIP'nın ekonomik analizinde en önemli parametre olarak göze çarpmaktadır. Buna ek olarak, işletme maliyetleri de oldukça önemlidir. Yakıt fiyatlarına endeksli olan elektrik fiyatları, kompresörden ve pompadan çekilen kWh başına enerji maliyetlerini artırmakta ve bu da işletme maliyetlerinde artışa neden olmaktadır.

Ekonomik analizleri gerçekleştirirken, önce ilk yatırım maliyetleri hesaplanır. Daha sonra, saatlik COP değerleri, ısıtma ve soğutma mevsimlerini içeren on yıllık bir süre için bir MATLAB kodu ile elde edilir. Kompresörden çekilen güç, ofisin ısıtma ve soğutma yüklerinin saatlik bazda hesaplanan COP değerlerine bölünmesiyle elde edilir. Isıtma ve soğutma sezonlarında sistemin çalışma süresi boyunca sirkülasyon pompalarından çekilen güç kompresörden çekilen güce eklenmiştir. On yıllık dönem için saatlik bazda belirlenen toplam güç bilindiğinde, işletme maliyetleri hesaplanabilir. Bununla birlikte, Türkiye'deki elektrik fiyatlarındaki artış bu maliyetlere ilave edilmiş ve her yıl için işletme maliyetlerinin bugünkü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan işletme maliyetlerinin bugünkü değerleri ilk yatırım maliyetleriyle toplanmıştır. Ödenecek yıllık tutar, sabit bir faiz oranı ile sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak belirlenir. İlk yatırım ve işletme maliyetlerini kullanarak, bir optimizasyon parametresi olan bir referans fonksiyonu tanımlanmıştır. Referans fonksiyonu, ofisin toplam yıllık ısıtma ve soğutma

yüklerinin toplam yıllık maliyete bölünmesiyle elde edilir. Farklı senaryolar için bir optimizasyon parametresi olan referans fonksiyonun değişimi irdelenmiştir.

TKIP sisteminin ilk yatırım maliyetleri; kazı çalışması, ısı pompası, sirkülasyon pompası, boru ve bağlantı parçaları ve işçilik'tir. Aşağıda sistemin ilk yatırım maliyetlerinin denklemi verilmiştir.

$$C_i = C_{kazı} + C_{ısıpompası} + C_{sirk.pompası} + C_{boru} + C_{işçilik} \tag{4.60}$$

Burada;

C_i: İlk yatırım maliyeti
$C_{kazı}$: Kazı maliyeti
$C_{ısı\ pompası}$: Isı pompası maliyeti
$C_{sirk.pompası}$: Sirkülasyon pompası maliyeti
C_{boru}: Boru maliyeti
$C_{işcilik}$: İşçilik maliyeti'dir.

İlk yatırım maliyetleri irdelendiğinde kazı, ısı pompası, sirkülasyon pompası ve boru maliyetlerinin genel denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir [32]:

$$C_{kazı} = a_1 A_{kazı} = a_1 (NPT) L_{TID} Y \tag{4.61}$$

$$C_{ısıpompası} = a_2 Q_{ısıpompası}^{a3} \tag{4.62}$$

$$C_{sirk.pompası} = a_4 W_{pompa}^{a5} \tag{4.63}$$

$$C_{boru} = c_{boru} (NPT) L_{TID} \tag{4.64}$$

Burada;

a_1 değeri kazı ve tekrar doldurma giderinin bölgesel maliyetine göre elde edilir. a_2-a_5'in değerleri, ekipmanların bölgesel fiyatı ve ofisin toplam yük ihtiyacı temel alınarak elde edilir. c_{boru}, boru çap ve kalınlığına göre birim metre başına yüksek yoğunluklu polietilen borunun bölgesel maliyetidir. $c_{işçilik}$, toplam hizmet maliyeti olup toprağın altına boruların yerleştirilmesi, ısı pompaları ile şartlandırılacak mahal arasında boru döşenmesi, ısı pompasının kurulumu ve devreye alınması durumlarını içerir.

TKIP sistemlerinin enerji tüketimi iki başlık altında incelenebilir; Sirkülasyon pompası ve kompresördür. Sirkülasyon pompasının enerji tüketimi şöyledir [32]:

$$E_{pompa} = (\tau_h + \tau_c) \frac{V_f x H_{pompa}}{\eta_{pompa}} \tag{4.65}$$

Burada;

τ_h : Sistemin ısıtma sezonundaki toplam çalışma süresi (s)
τ_c : Sistemin soğutma sezonundaki toplam çalışma süresi (s)
V_f : Hacimsel debi (m^3/h)
H_{pompa} : Pompa basma yüksekliği (m)

MATLAB programında yazılan kod yardımıyla ısı pompası çevrimindeki saatlik COP değerleri on yıllık için hesaplanır ve kompresörün on yıl için saatlik enerji tüketimi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$W_{komp,h} = \frac{Q_h}{COP_h} \quad \text{ve} \quad W_{komp,\mathrm{c}} = \frac{Q_c}{COP_c} \tag{4.66}$$

$$E_{komp} = \sum W_{komp,h} + \sum W_{komp,\mathrm{c}} \tag{4.67}$$

Sonuç olarak, sistemin toplam enerji tüketim maliyeti aşağıdaki gibidir;

$$C_e = (E_{pompa} + E_{komp})\,\mathrm{E}_{\mathrm{tarife}} \tag{4.68}$$

E_{tarife} yurtiçi elektrik tüketim tarifesi olup Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'dan alınmıştır. Son on yılda yurtiçi konut veya işyeri elektrik fiyatları istikrarlı bir şekilde artmıştır. Türkiye'nin EPDK'nın verilerine göre, son 10 yılda işyeri elektrik fiyatlarındaki artış oranları % 11 civarında olmuştur. Literatürde bu kavrama elektriğin maliyetindeki artışı oranı denilmektedir. Toplam enerji tüketim maliyeti, elektriğin maliyetindeki artışı oranı dikkate alınarak on yıllık bir süre için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$C_e = C_{\mathrm{e},1} + \sum_{n=2}^{n=10} C_{\mathrm{e},n} e \tag{4.69}$$

Her yıl için enerji tüketimi maliyetlerinin net bugünkü değerleri hesaplanarak ilk yatırım maliyetlerine eklenmiştir. İşletme ve ilk yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerlerinden yıllık ödenmesi gereken maliyet tutarı, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, sabit bir faiz oranında sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak belirlenir.

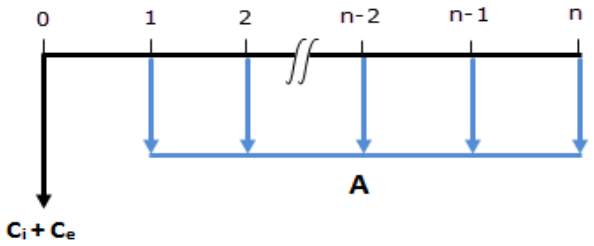
$$\mathrm{A} = (C_i + C_e)\,\mathrm{CRF} \tag{4.70}$$

C_i+C_e= Yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamının bugünki değeri

A= Yıllık ödenecek olan miktar

n=Faiz dönem sayısı

i=Faiz oranı



Şekil 4. 8 Nakit Akış Diyagramı

Bugünkü yatırım yapılan tutarı, yılsonu ödemelerine eşit bir seride dağıtmak için kullanılır. Aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$CRF = \left[\frac{i(i+1)^{v}}{(i+1)^{v} - 1} \right] \tag{4.71}$$

Referans fonksiyon, ofisin toplam yıllık ısıtma ve soğutma yüklerinin, sabit bir faiz oranında sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak yıllık ödenmesi gereken toplam maliyetine bölerek elde edilir. Referans fonksiyonun ifadesi şöyledir;

$$F_{ref} = \frac{Q_h + Q_c}{A} \tag{4.72}$$

4.2 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline (Radye Temel) Isı Değiştirici Borularının Gömülmesi Durumu

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de yenilenmekte olan binaların temellerinin altındaki toprağa ve temeline, yatay ısı değiştirici boruları yerleştirilerek TKIP sistemlerinin performanslarının incelenmesidir. TKIP sistemlerinin uygulamalarında en önemli engel kazı maliyetleridir. Bu sistemlerin kullanımı, sadece kazı maliyetlerini azaltmak veya ortadan kaldırmak değil aynı zamanda da düşük karbonlu ev ve işyerleri elde etmektir.

Bu çalışmada, İstanbul'da bir alışveriş merkezinin temelinin altındaki toprağa ve temeline yerleştirilen yatay ısı değiştirici boruları için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Alışveriş merkezi tüm yıl boyunca sabah 9 akşam 10 saatleri arasında

çalışmaktadır. Isıtma ve soğutma sezonunda her gün için devamlı 20 kW'lık bir ısı yükü topraktan çekilmekte ve toprağa aktarılmaktadır. MATLAB'da geliştirilen kod sayesinde, bina temeline ve bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilen paralel ısı değiştirici boru sayısının etkileri simülasyon çalışmalarında irdelenmiştir. Ayrıca, yatay ısı değiştirici boruları bina temeline yerleştirilmesi durumunda, boruların farklı gömme derinlikleri ve farklı bina temel yükseklikleri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ek olarak, yatay ısı değiştirici boruları bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesi durumunda, boruların toprakta farklı gömme derinlikleri ve farklı bina temel yükseklikleri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bina temelinde ve bina temelinin altındaki toprağa gömülen ısı değiştirici boruları etrafındaki saatlik beton ve toprak sıcaklıkları ve akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, 10 yıl için 17 farklı simülasyon çalışması yapılarak elde edilmiştir. Ardından, MATLAB'da yazılan yeni bir kod sayesinde, bu sıcaklıklar girdi parametreleri olarak verilerek ısı pompa çevriminde enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışmaları, ısıtma sezonunda 3 farklı yoğuşma sıcaklığı için yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda toplamda 51 farklı simülasyon çalışması yapılmıştır.

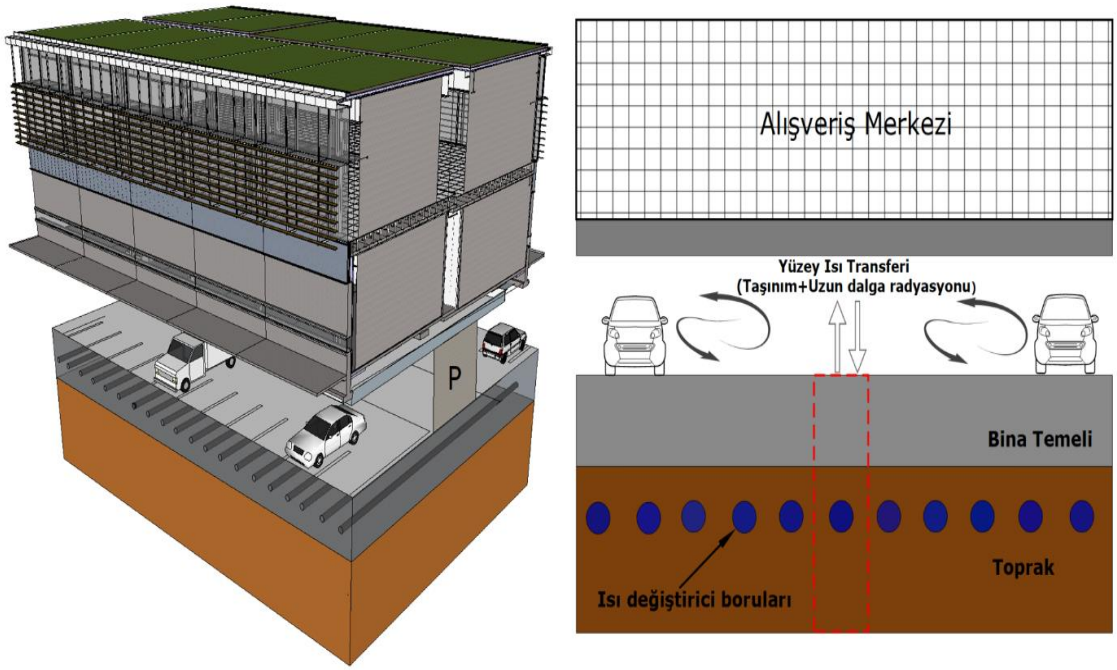
Sonuç olarak, 51 farklı simülasyon çalışması için ısı pompasında enerji analizi yapılarak 10 yıllık saatlik COP değerleri hesaplanmıştır. Kompresörden çekilen güç, AVM'ne sağlanan saatlik ısıtma ve soğutma yüklerinin, saatlik hesaplanan COP değerlerine bölünmesiyle hesaplanır. Sirkülasyon pompalarından çekilen güç ise çalışma süreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. 10 yıllık dönem için saatlik bazda belirlenen toplam güç ve kWh başına elektriğin birim fiyatı biliniyor olduğundan, işletme giderleri hesaplanır. Türkiye'deki Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK)'nun verilerine göre, son on yılda ulusal bazda iş yeri elektrik fiyatlarındaki artış oranı yaklaşık % 11'dir. Buna piyasalarda elektrik üretimindeki maliyetin artış oranı denir. Tüm simülasyon çalışmaları, elektrik üretimindeki maliyet artış oranını da dahil ederek gerçekleştirilmiştir. TKIP sistemlerinin işletme maliyetlerinin yanında, ilk yatırım maliyetleri şunlardır: kazı çalışması, ısı pompası, sirkülasyon pompası, boru ve işçiliktir.

İlk yatırım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak, optimizasyon parametresi olan bir referans fonksiyon tanımlanmıştır. Referans fonksiyon, alışveriş merkezine verilen

toplam yıllık ısıtma ve soğutma yüklerinin, toplam yıllık ödemeye bölünmesiyle elde edilir. Tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilmiştir.

4.2.1 Simülasyon Çalışmasının Özeti

Yatay TKIP sistemi özellikle geniş bir alana uygulandığında, maliyet-verimlilik açısından büyük avantajlar sağlar. Son yıllarda İstanbul'da önemli bir nüfus artışının olması, çoğu zaman yeraltı otoparkına sahip yüksek katlı bina ve işyeri inşa edilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu binalarda, bazı dikey TKIP uygulamaları hariç, bina temeline yatay TKIP sistemleri hâlihazırda uygulanmamıştır. Ülkemizde genellikle yatay TKIP uygulamalarında, yatay toprak ısı değiştirici borularının binaların bahçelerine veya binaların çevrelerine gömüldüğü görülmektedir. Kazı maliyetleri nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinde meydana gelen artış, kullanıcılar nezdinde, bu sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla tercih etmemesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, kazı maliyetlerini azaltmak veya önlemek için iki yöntem benimsenmiştir. Birincisi, bina inşa edilirken yatay ısı değiştirici borularını bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesiyle kazı maliyetlerini düşürmek; İkincisi, inşaat yapılırken, yatay ısı değiştirici borularını, bina temeline yerleştirerek kazı maliyetlerini ortadan kaldırmaktır. Kazı maliyetlerini azaltmak ya da önlemek ve yer altı otoparkıyla beraber binayı inşa etmek mümkündür.



Şekil 4. 9 Enerji-temel sistemi

Bu çalışmada, Şekil 4.9'da, yeraltı otoparkına sahip bir alışveriş merkezinin temeline ve temelinin altındaki toprağa yerleştirilmiş, enerji-temel sistemi de denilen, ısı değiştirici boruları görülmektedir.

Bir alışveriş merkezinin temeline ve temelinin altındaki toprağa çeşitli gömme derinliklerinde ve paralel boru sayılarında (NPT) gömülen yatay ısı değiştirici boruları için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yatay ısı değiştirici boruları bina temeline ve bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesi durumunda TKIP sistemlerinin performansları irdelenmiştir. Ayrıca, ilk yatırım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak, optimizasyon parametresi olan bir referans fonksiyon tanımlanmıştır. Elektrik fiyatlarındaki artış oranının, paralel boru sayısının ve gömme derinliklerinin referans fonksiyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

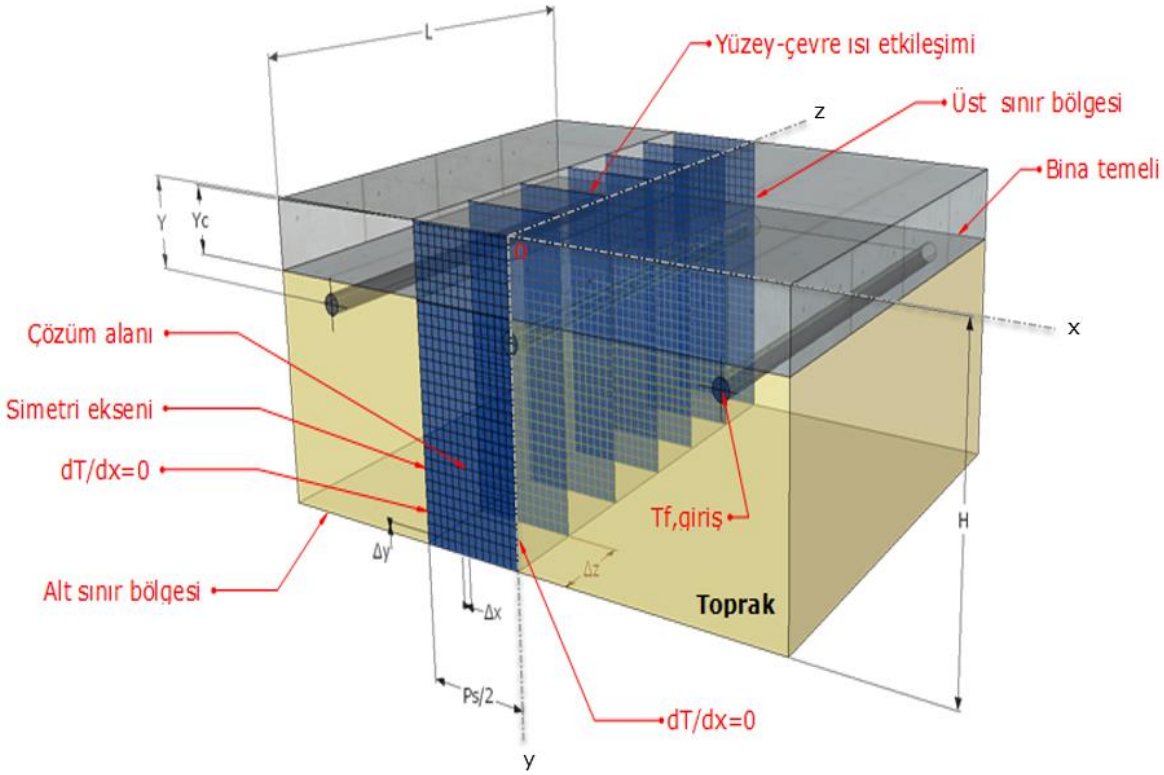
4.2.2 Geliştirilen Modelin Tanıtımı

Toprak ve betonda zamana bağlı-üç boyutlu sıcaklık dağılımını çözmek için gerçekçi sınır koşulları ile yeni bir model geliştirildi. Boru ekseni boyunca sıcaklığın değişimi ihmal edilebilecek düzeydedir. Bundan dolayı, çözüm alanında akışkan sıcaklığı da dahil edilerek, iki boyutlu ve dinamik sınır koşullarında toprak ve beton içerisinde ısı transfer denklemleri çözülmüştür. Öncelikle, Eşitlik (4.2) iki boyutlu olarak tüm alan için çözülmüş ve sonrasında, üç boyutlu çözüm elde etmek için çözüm boru ekseni boyunca genişletilmiştir.

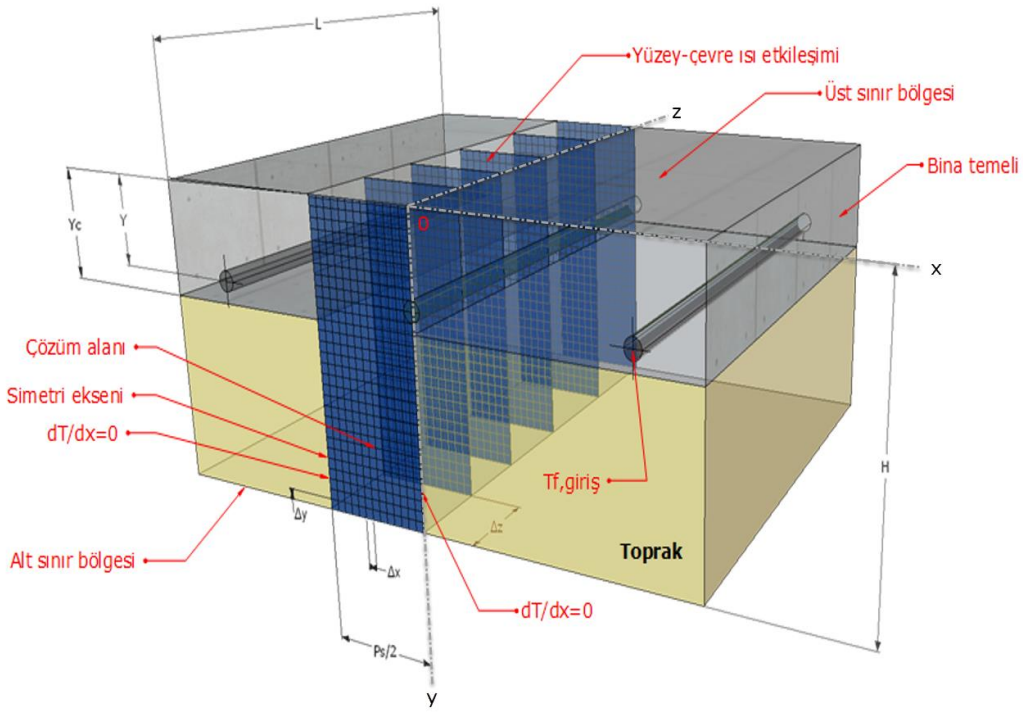
Şekil 4.10'da görülen ısı değiştirici borularının bina temelinin altındaki toprağa veya bina temeline yerleştirilmesi halinde, çözümün gerçekleştirilmesi noktasında bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar şöyledir;

- Yatay paralel boruların tümü aynı derinlikte toprağa veya betona gömülmüştür,
- Hacimsel debi her boruda aynıdır,
- Boru eksenine dik bir kesitte akışkan sıcaklığı değişmez,
- Kütle transferinin toplam ısı aktarım oranına etkisi ihmal edilmiştir,
- Kolektörlerin etkileri göz ardı edilmiştir,
- Borunun yerleştirildiği toprak ve betonun termal özelliklerinin ve borunun termal özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir,

- Toprak ve betonun ısıl özellikleri, çözüm alanının her noktasında homojen olduğu kabul edilir.



(a)



(b)

Şekil 4. 10 Bina temelinin altındaki toprağa (a) ve bina temeline (b) gömülü borular

Toprak ve betonda paralel borulu yatay ısı değiştirici boruları ve çözüm alanı sırasıyla Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b'de verilmiştir. Model, L uzunluğunda yatay paralel borulardan ve P_s borular arası mesafeden oluşmaktadır. Şekil 4.10a'da gösterildiği gibi, boru toprağa gömülmüşse, Y gömme derinliği, Y_c binanın temel yüksekliği ve Y-Y_c bina temelinin altındaki borunun toprağa gömülü derinliğidir. Şekil 4.10b'de gösterildiği üzere, boru bina temeline gömülmüşse, Y gömme derinliği, Y_c binanın temel derinliğidir. Çözüm alanındaki problemin başlangıç ve sınır koşulları Eşitlik (4.3-4.7)'de tanımlanmıştır.

Başlangıç sınır koşulunu elde etmek için, simülasyon süresinin başlangıcında toprağın sıcaklık dağılımı belirlenmelidir. Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe göre değişimi Eşitlik (4.10)'da verilmiştir.

Yukarıdaki denklemler kullanarak sıcaklığın iki boyutta dağılımı belirlenebilir. Üç boyutlu olarak sıcaklık dağılımını elde etmek için, boru içindeki akışkan ile toprak arasında ısı transferinin değişimi Şekil 4.3'da görülmektedir. Boru içerisinde akışkan sıcaklığındaki değişim, yukarıda Eşitlik (4.38-4.45)'de görüldüğü üzere enerji korunum denklemi yardımı ile ifade edilir.

Aynı şekilde, boru betona gömüldüğünde ise, beton çözüm alanı ile boru arasındaki enerji dengesi kullanarak aşağıdaki gibi akışkan çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır;

$$T_{f,o} = T_c - (T_c - T_{f,i}) e^{\frac{-k_c L}{m_f C_{p,f}}} \tag{4.73}$$

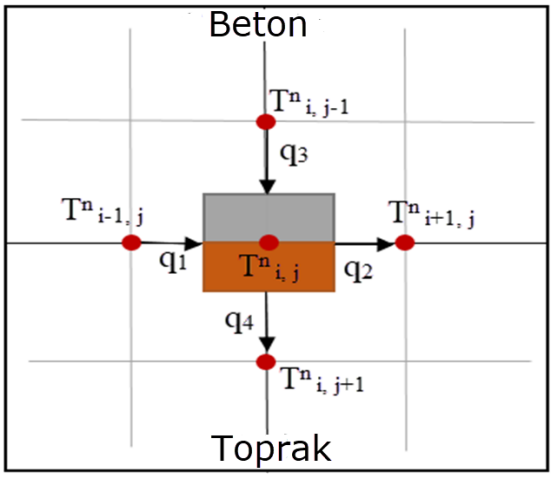
Burada; T_c beton sıcaklığı ve k_c betonun ısı iletim katsayısıdır.

Boru ekseni boyunca akışkanın sıcaklık dağılımı, iki boyutlu çözüm alanına bağlanarak uygulanmış ve elde edilmiştir. Üç boyutlu toprak ve beton sıcaklık profilleri, tüm boruyu küçük parçalara bölerek belirlenmiştir. Tüm boru boyunca bölünen parçalar düşünüldüğünde, başlangıçtaki parçanın akışkan çıkış sıcaklığı önündeki parçanın akışkan giriş sıcaklığı yaklaşımını kullanarak, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir.

ADI yöntemi ile toprakta ve betondaki ısı transfer denklemleri, iki farklı zaman adımında satırlar ve sütunlar için ayrı ayrı formüller yazarak, düğüm sıcaklıklarını çözmek için

kullanılmıştır. Eşitlik (4.2), ADI yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Denklemin sonlu fark biçimi yukarıda Eşitlik (4.47-4.52)'de verilmiştir.

Beton ve toprağın ara yüzey düğümlerinde enerji dengesi, her düğümün çevresindeki kontrol hacmi için yazılmıştır. Şekil 4.11'de, düğüm etrafındaki kontrol hacmi ve ısı akıları göz önünde bulundurularak, beton ve toprak arasındaki katman ara yüzündeki bir düğümün enerji dengesinin nasıl elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 4. 11 Toprak ve beton ara yüzlerinin enerji dengesi

Elde edilen enerji dengesi aşağıda verilmiştir [33]:

$$q_1\text{-}q_2 + q_3 - q_4 = (\rho C_p)_{ave}(\Delta x)(\Delta y)\frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} \tag{4.74}$$

Buradan;

$$(\rho C_p)_{ort} = \frac{(\rho C_p)_{toprak} + (\rho C_p)_{beton}}{2} \tag{4.75}$$

$$k_{ort} = \frac{k_s + k_c}{2} \tag{4.76}$$

Isı akısı terimleri ise:

$$q_1 = k_{ort}\frac{T^n_{i-1,j} - T^n_{i,j}}{\Delta x}\Delta y \tag{4.77}$$

$$q_2 = k_{ort}\frac{T^n_{i+1,j} - T^n_{i,j}}{\Delta x}\Delta y \tag{4.78}$$

$$q_3 = k_c \frac{T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} \Delta x \tag{4.79}$$

$$q_4 = k_s \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} \Delta x \tag{4.80}$$

Tüm ısı akısı denklemleri enerji dengesi denklemine yerleştirilerek denklemler yeniden düzenlenmiş olup, aşağıda fark denkleminde yeni parametrelerin tanımlanmasını sağlamıştır.

$$r_{ort} = \frac{k_{ort}}{(\rho C_p)_{ort}} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \tag{4.81}$$

$$r_c = \frac{k_c}{(\rho C_p)_{ort}} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \tag{4.82}$$

$$r_s = \frac{k_s}{(\rho C_p)_{ort}} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \tag{4.83}$$

ADI yönteminin fark formülleri tekrar düzenlenerek, toprak ve beton tabakanın üst ve alt ara yüzey düğümleri için yeni fark formülleri elde edildi. Eşitlik (4.84) ve (4.85), satır ve sütunlar için yeni arayüz formülleri olarak bulunmuştur.

$$-r_{ort}.T_{i-1,j}^{\,n+1} + (1+2r_{ort}).T_{i,j}^{\,n+1} - r_{ort}.T_{i+1,j}^{\,n+1} = r_s.T_{i,j-1}^{\,n} + (1-r_s-r_c).T_{i,j}^{\,n} + r_c.T_{i,j+1}^{\,n} \tag{4.84}$$

$$-r_s.T_{i,j-1}^{\,n+2} + (1+r_s+r_c).T_{i,j}^{\,n+2} - r_c.T_{i,j+1}^{\,n+2} = r_{ort}.T_{i-1,j}^{\,n+1} + (1-2r_{ort}).T_{i,j}^{\,n+1} + r_{ort}.T_{i+1,j}^{\,n+1} \tag{4.85}$$

Bina temelinin üst yüzeyi kapalı bir alan olduğundan, bina temelinin üst yüzeyinde sadece konveksiyon ve uzun dalga radyasyonuyla ısı transferi meydana gelir. Enerji denge denklemlerinin kullanılarak, yüzey ısı akısı yüzey-ortam ısı etkileşimi mekanizmaları dikkate alınarak elde edilmiştir. Bina temelinin üst yüzeyinde konveksiyon ve uzun dalga radyasyonundan kaynaklanan ısı akısının denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\dot{q}_h = h_{birleştirilmiş}(T_a - T_y) \tag{4.86}$$

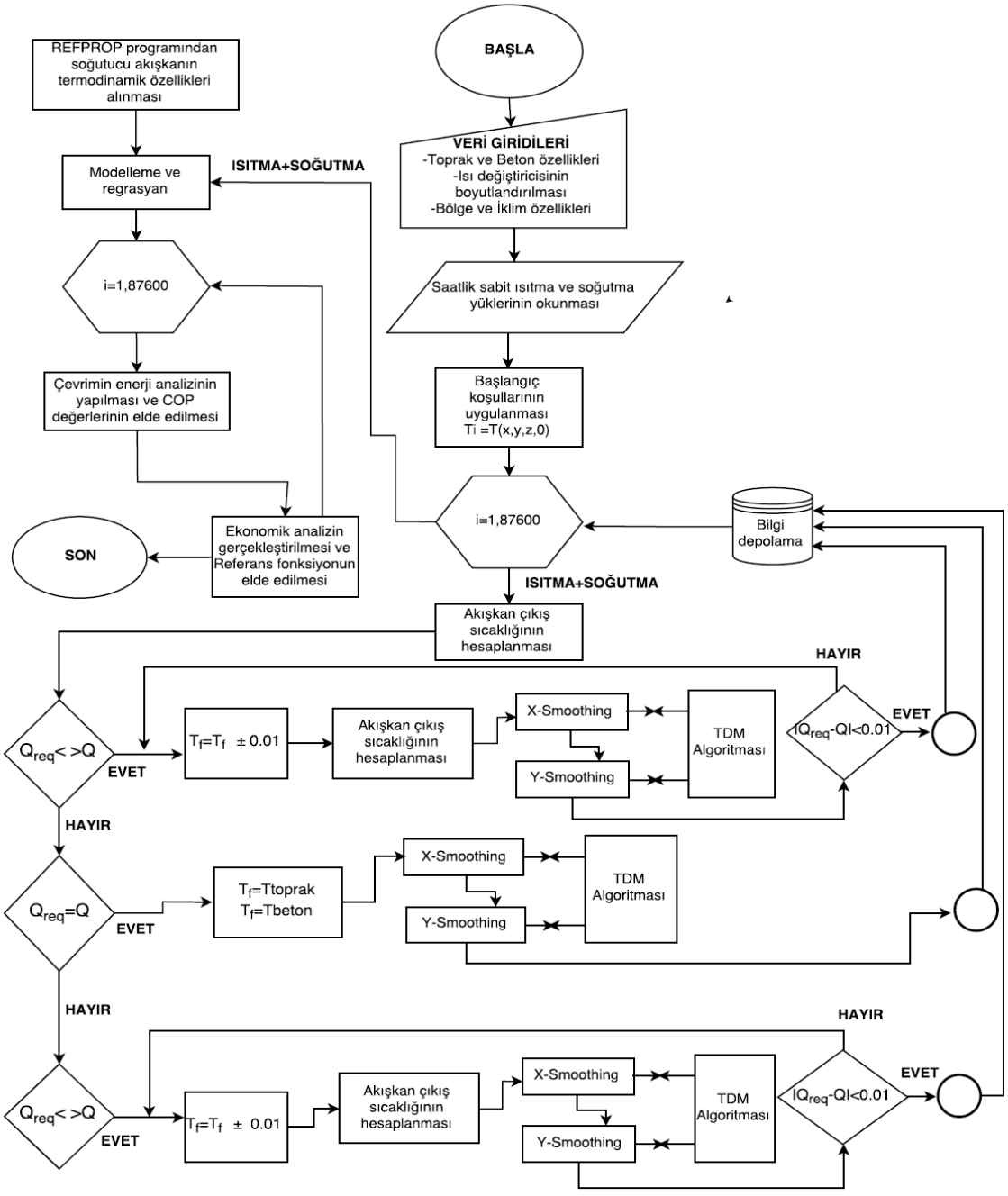
Bu denklemde;

$h_{birleştirilmiş}$: Birleştirilmiş ısı transfer katsayısı (W/m^2K),

T_a: Bina temelinin üstündeki iç ortam sıcaklığı (^oC),

T_Y: Bina temelinin üst yüzeyindeki yüzey sıcaklığı (^oC)'dır

Toprağın ve betonun sıcaklık dağılımı ADI sonlu farkların denklemlerini kullanarak belirli bir zaman için art arda çözülür. Matrisler üç köşegenli olduğundan, bu denklemleri çözmek için Thomas Algoritması kullanılmıştır. Bundan dolayı, MATLAB'da sınır şartlarıyla beraber ADI sonlu fark denklemleri çözülmüş olup, sonuçlar üzerinde çözüm parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Geliştirilen MATLAB kodunun algoritmasının blok diyagramı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 12 Çözüm için algoritmanın blok diyagramı

İlk olarak, gerekli girdi parametreleri belirlenerek başlangıç sınır koşulları uygulanır. Sonra ön tahmini yapılan akışkan giriş sıcaklığından akışkan çıkış sıcaklığı ve buradan da topraktan/betondan çekilen ya da toprağa/betona bırakılan ısı ($\dot{Q}$) hesaplanır. Isıtma sezonu için, belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) büyükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C arttırılır. Tersi durum söz konusu olduğunda yani belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) küçükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C azaltılır.

Soğutma sezonu için, belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) büyükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C azaltılır. Tersi durum söz konusu olduğunda yani belirlenen $\dot{Q}$ değeri binanın saatlik gerekli ısı yükünden ($\dot{Q}_{req}$) küçükse, akışkan giriş sıcaklığı 0.01 ^{o}C arttırılır. Sonuç olarak bu proses, binanın saatlik ısıtma veya soğutma ısı yükü ile topraktan/betondan çekilen ya da toprağa/betona bırakılan ısı yükü arasındaki fark 0.01 kW'tan az olana kadar tekrarlanır.

Sistemin çalışmadığı zamanlarda ise yani $\dot{Q}_{req}$=0 olduğunda akışkan giriş sıcaklığı toprak veya beton sıcaklığına eşit alınmaktadır. Bunun sebebi, binanın ısıtma veya soğutma yükü ihtiyacı olmadığından, akışkan toprakta veya betonda dolaşmayacak yani toprak veya beton kendi haline bırakılacaktır. Toprak ve beton çözüm alanında akışkan giriş sıcaklığı saatlik olarak bu prosesin tekrarlanmasıyla belirlendikten sonra buradan akışkan çıkış sıcaklıkları ve toprak ve beton bölgesinde sıcaklık dağılımı elde edilir. Bu proses 10 yıllık periyotta her saat için tekrarlanır.

MATLAB'ta geliştirilen kod sayesinde, bina temeline ve bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilen borular etrafındaki saatlik toprak ve beton sıcaklıkları, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları 10 yıllık periyotta elde edilir. Sonrasında, MATLAB'ta geliştirilen yeni bir kod yardımıyla, bu sıcaklıklar girdi parametresi olarak verilip ısı pompası çevriminde enerji analizi yapılır. Gerçekleştirilen enerji analizi neticesinde farklı simülasyon çalışmaları için saatlik COP değerleri elde edilir. Akabinde, ekonomik analiz yapılarak bir optimizasyon parametresi olan referans fonksiyon tanımlanarak tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilir.

4.2.3 Ekonomik analiz ve referans fonksiyon

TKIP sisteminin ilk yatırım maliyetleri şunlardır: kazı maliyeti, boru maliyeti, ısı pompası maliyeti ve işçilik maliyetleridir. TKIP sistemlerinin uygulamaları incelendiğinde, ilk yatırım maliyetleri arasında kazı maliyeti en kritik öneme sahiptir. Yatay TKIP uygulamaları irdelendiğinde, genellikle ısı değiştirici boruları bahçelere veya binaların çevresine yerleştirilmektedir. Kazı çalışmalarından dolayı artan maliyet, kullanıcıların bu sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla kullanmaktan kaçınmalarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, kazı maliyetlerini azaltmak veya önüne geçmek için iki yöntem benimsenmiştir. Öncelikle, bina inşa edilirken bina temelinin altındaki toprağa ısı değiştirici borularının yerleştirilmesiyle, kazı maliyetlerini azaltmak; İkincisi, yine bina inşa edilirken bina temeline ısı değiştirici borularının yerleştirilmesiyle kazı maliyetlerinin önüne geçmektir.

TKIP'nın ekonomik analizinde diğer önemli maliyetse işletme maliyetlerdir. Yakıt fiyatlarına endeksli elektrik fiyatları arttığında kompresörden ve pompadan çekilen kWh başına enerji maliyetleri artmakta ve bu da işletme maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. Ekonomik analizler gerçekleştirirken, önce ilk yatırım maliyetleri hesaplanmıştır. Ardından, 10 yıl boyunca saatlik COP değerleri, ısı pompası çevrim analizi sonucunda MATLAB'da uygulanan yeni bir kod yardımıyla hesaplanmıştır. Kompresörden çekilen güç, AVM'ye verilen belli ısıtma ve soğutma yüklerinin saatlik bazda hesaplanan COP değerlerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Çalışma süresi boyunca sirkülasyon pompalarından çekilen güç de hesaplanarak, 10 yıllık dönem için saatlik bazda toplam güç belirlenmiş ve sonuç olarak işletme maliyetleri hesaplanmıştır.

Türkiye'deki elektrik fiyatlarındaki artış bu maliyetlere ilave edilmiş ve her yıl maliyetlerin bugünkü değerleri hesaplanmıştır. Her yıl için bugünkü değerleri hesaplanan işletme maliyetleri, ilk yatırım maliyetlerine eklenir. Ödenecek yıllık tutar, sabit bir faiz oranı ile sermaye geri kazanım faktörü kullanılarak belirlenmiştir. İlk yatırım ve işletme maliyetlerini kullanarak bir referans fonksiyonu bir optimizasyon parametresi olarak tanımlanmıştır. Referans fonksiyonu, alışveriş merkezine verilen toplam yıllık ısıtma ve soğutma yüklerinin toplam yıllık ödemeye bölünmesiyle elde edilir. Tüm simülasyon çalışmaları için referans fonksiyon elde edilmiştir.

İlk yatırım maliyetleri; kazı çalışması, ısı pompası, sirkülasyon pompası, boru ve bağlantı parçaları ve işçiliktir. Aşağıda sistemin ilk yatırım maliyetlerinin denklemi verilmiştir.

$$C_i = C_{kazı} + C_{ısıpompası} + C_{sirk.pompası} + C_{boru} + C_{işçilik} \quad (4.87)$$

Burada;

C_i: İlk yatırım maliyeti
$C_{kazı}$: Kazı maliyeti
$C_{ısı\ pompası}$: Isı pompası maliyeti
$C_{sirk.pompası}$: Sirkülasyon pompası maliyeti
C_{boru}: Boru maliyeti
$C_{işcilik}$: İşçilik maliyeti'dir.
İlk yatırım maliyetleri irdelendiğinde kazı, ısı pompası, sirkülasyon pompası ve boru maliyetlerinin genel denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir [32];

$$C_{kazı} = a_1 A_{kazı} = a_1 (NPT) L_{TID} (Y - Y_c) \quad (4.88)$$

$$C_{ısıpompası} = a_2 Q_{ısıpompası}^{a3} \quad (4.89)$$

$$C_{sirk.pompası} = a_4 W_{pompa}^{a5} \quad (4.90)$$

$$C_{boru} = c_{boru} (NPT) L_{TID} \quad (4.91)$$

Burada;

a_1 değeri kazı ve tekrar doldurma giderinin bölgesel maliyetine göre elde edilir. a_2-a_5'in değerleri, ekipmanların bölgesel fiyatı ve alışveriş merkezinin yük ihtiyacı temel alınarak elde edilir. c_{boru}, boru çap ve kalınlığına göre birim metre başına yüksek yoğunluklu polietilen borunun bölgesel maliyetidir. $c_{işçilik}$, toplam hizmet maliyeti olup toprağın altına boruların yerleştirilmesi, ısı pompaları ile şartlandırılacak mahal arasında boru döşenmesi, ısı pompasının kurulumu ve devreye alınması durumlarını içerir.

TKIP sistemlerinin enerji tüketimi iki başlık altında incelenebilir. Bunlar; sirkülasyon pompası ve kompresördür. Sirkülasyon pompasının enerji tüketimi Eşitlik (4.65)'de verilmiştir. MATLAB programında yazılan kod yardımıyla ısı pompası çevrimindeki saatlik COP değerleri on yıllık için hesaplanır ve kompresörün on yıl için saatlik enerji tüketimi Eşitlik (4.66 ve 4.67)'de elde edilmiştir. Sonuç olarak, sistemin toplam enerji tüketim maliyeti Eşitlik (4.68)'deki gibi hesaplanmıştır. Toplam enerji tüketim maliyeti, elektriğin maliyetindeki artışı oranı dikkate alınarak on yıllık bir süre için Eşitlik (4.69)'da elde edilmiştir.

Her yıl için enerji tüketimi maliyetlerinin net bugünkü değerleri hesaplanarak ilk yatırım maliyetlerine eklenmiştir. İşletme ve ilk yatırım maliyetlerinin net bugünkü değerlerinden yıllık ödenmesi gereken maliyet tutarı Eşitlik (4.70)'deki gibi hesaplanmış olup, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, sabit bir faiz oranında sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak belirlenir.

Referans fonksiyon, alışveriş merkezine sağlanan toplam yıllık ısıtma ve soğutma yüklerinin, sabit bir faiz oranında sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak yıllık ödenmesi gereken toplam maliyetine bölünmesiyle elde edilmiştir. Referans fonksiyonun ifadesi Eşitlik (4.72)'deki gibi hesaplanmıştır.

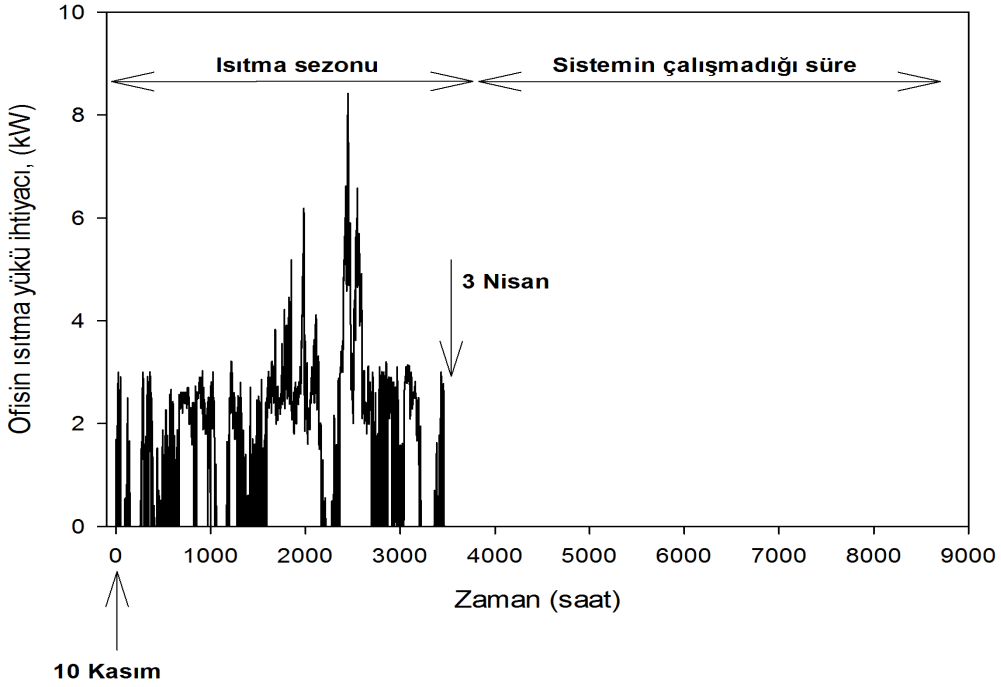
4.3 Simülasyon Çalışmaları

4.3.1 Isıtma Sezonuna ait Simülasyon Çalışması

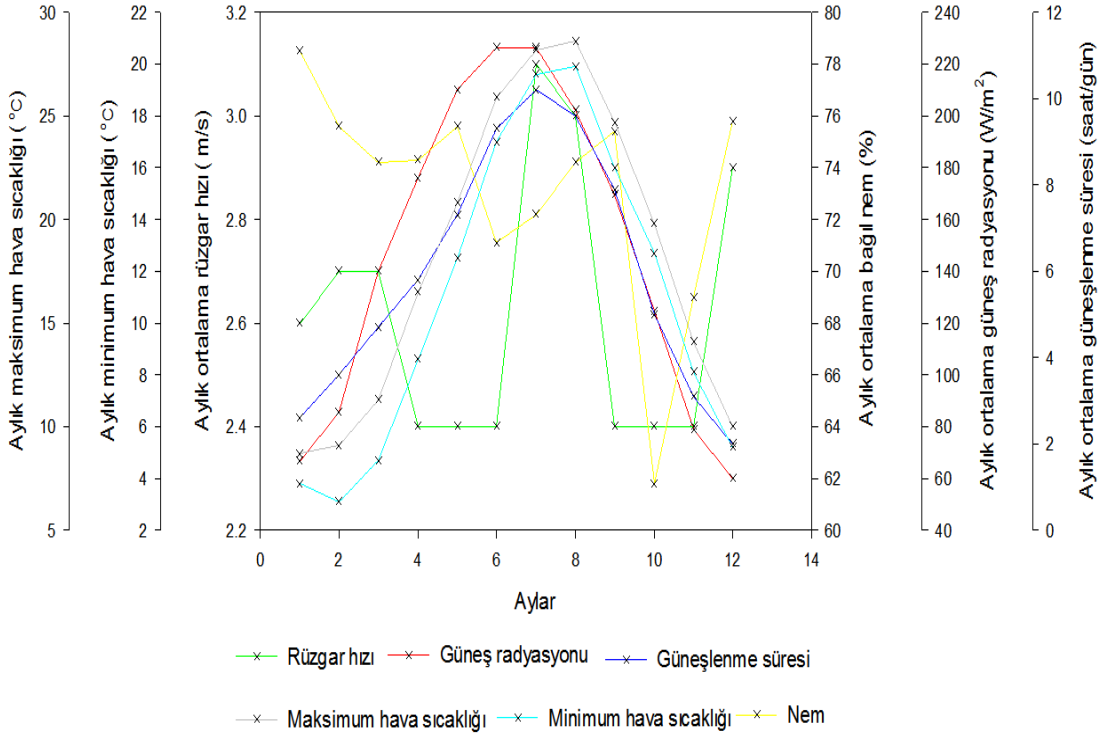
İstanbul'da 200 m^2'lik ve zeminden yüksekliği 3.66 m olan dikdörtgen bir ofis binasının ısıtma ihtiyacını belirlemek üzere HAP programı kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de duvar, tavan, zemin ve pencerelerin toplam ısı transfer katsayıları verilmiştir. Ofisin ısıtma yükü belirlenirken çalışanlardan, ekipmanlardan ve aydınlatmadan gelen yükler de dâhil edilmiştir. Ofis yıl boyunca sabah 6'dan akşam 7 arasında çalışmakta ve ısıtma sezonunda çalışma saatleri arasında odanın sıcaklığı 20 °C, çalışma saatlerinin dışında 15 °C olacak şekilde HAP programında tasarlanmıştır. Ofisin yıl boyunca gerekli ısı ihtiyacı Şekil 4.13'de görülmektedir. Yıl boyunca 10 Kasım ile 3 Nisan arasında ısıtma yapılacak olup, kalan zaman aralıklarında sistem çalıştırılmamaktadır.

Çizelge 4. 1 Referans ofisin özellikleri

Ofisin Özellikleri		
U_w	0.426	W/m^2 K
U_c	0.396	W/m^2 K
U_f	0.398	W/m^2 K
U_{wi}	3	W/m^2 K
U_d	4	W/m^2 K
A_b	200	m^2
H_o	3.66	m



Şekil 4. 13 Ofisin yıl boyunca saatlik gerekli ısı ihtiyacı



Şekil 4. 14 İstanbul ili için meteorolojik veriler

Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İstanbul istasyonunda [114] ölçülen veriler alınarak toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akıları hesaplanmıştır. İstanbul için aylık ortalama rüzgâr hızları, bağıl nemleri, en düşük ve en yüksek hava sıcaklıkları, güneş

radyasyonları ve güneşlenme süreleri Şekil 4.14'de görüldüğü üzere, simülasyonda kullanılmak üzere Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır.

Yapılacak simülasyon çalışması için tasarım değişkenleri aşağıda verilmiştir [113];

Toprak tipi kumlu,
k_s =2 W/m K,
α_s = 0.000001171 m^2/s
İstanbul için;
$T_{t,ort}$ = 15.85 °C , $T_{h,ort}$ = 15.6 °C;
$T_{t,gen}$ = 10.4 °C , $T_{h,gen}$ = 10.8 °C;
Su +Etilen Glikol, V_f = 1 m^3/saat
L = 40 m, d_o/d_i = 32/26 mm
PPRC, k_p = 0.46 W/m K
Δx = Δy = 0.1 m , Δz = 1 m (ızgara boyutları), Δt=1800 s (zaman adımı).

Simülasyon çalışmalarında kullanılan tüm teknik parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

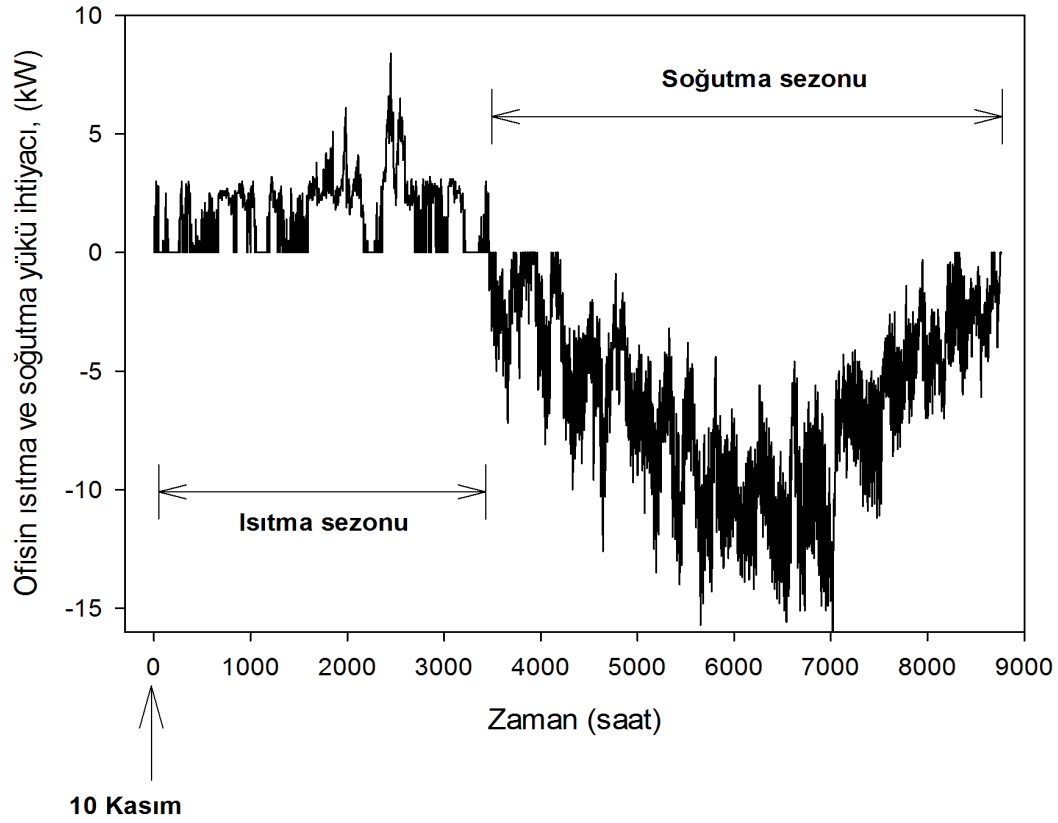
Çizelge 4. 2 Simülasyonda kullanılan teknik parametreler [113]

Simülasyonlar	NPT	Ps (m)	Y (m)	Simülasyonlar	NPT	Ps (m)	Y (m)	Simülasyonlar	NPT	Ps (m)	Y (m)
Sim. 1	10	0.5	1	**Sim. 13**	20	0.5	1	**Sim. 25**	30	0.5	1
Sim. 2		0.5	2	**Sim. 14**		0.5	2	**Sim. 26**		0.5	2
Sim. 3		0.5	3	**Sim. 15**		0.5	3	**Sim. 27**		0.5	3
Sim. 4		1	1	**Sim. 16**		1	1	**Sim. 28**		1	1
Sim. 5		1	2	**Sim. 17**		1	2	**Sim. 29**		1	2
Sim. 6		1	3	**Sim. 18**		1	3	**Sim. 30**		1	3
Sim. 7		2	1	**Sim. 19**		2	1	**Sim. 31**		2	1
Sim. 8		2	2	**Sim. 20**		2	2	**Sim. 32**		2	2
Sim. 9		2	3	**Sim. 21**		2	3	**Sim. 33**		2	3
Sim. 10		3	1	**Sim. 22**		3	1	**Sim. 34**		3	1
Sim. 11		3	2	**Sim. 23**		3	2	**Sim. 35**		3	2
Sim. 12		3	3	**Sim. 24**		3	3	**Sim. 36**		3	3

4.3.2 Isıtma ve Soğutma Sezonuna ait Simülasyon Çalışması

İstanbul'da 200 m^{2}'lik ve zeminden yüksekliği 3.66 m olan dikdörtgen bir ofis binasının ısıtma ve soğutma yükü ihtiyacını belirlemek üzere HAP programı kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de duvar, tavan, zemin ve pencerelerin toplam ısı transfer katsayıları verilmiştir.

Ofisin ısıtma yükü belirlenirken çalışanlardan, ekipmanlardan ve aydınlatmadan gelen yükler de dâhil edilmiştir. Ofis yıl boyunca sabah 6'dan akşam 7 arasında çalışmakta ve ısıtma sezonunda çalışma saatleri arasında odanın sıcaklığı 20 °C, çalışma saatlerinin dışında 15 °C, soğutma sezonunda çalışma saatleri arasında odanın sıcaklığı 24 °C, çalışma saatlerinin dışında 29 °C olacak HAP programında ısıtma ve soğutma yükleri elde edilmiştir. Ofisin yıl boyunca gerekli ısı ihtiyacı Şekil 4.15'te görülmektedir. Yıl boyunca 10 Kasım ile 3 Nisan arası ısıtma, kalan zaman aralıklarında ise soğutma yapılacaktır.



Şekil 4. 15 Ofisin yıl boyunca saatlik gerekli ısı ihtiyacı

Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İstanbul istasyonunda [114] ölçülen veriler alınarak toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akıları hesaplanmıştır. İstanbul için aylık ortalama rüzgâr hızları, bağıl nemleri, en düşük ve en yüksek hava sıcaklıkları, güneş radyasyonları ve güneşlenme süreleri Şekil 4.14'de görüldüğü üzere simülasyonda kullanılmak üzere Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Yapılacak birçok simülasyon çalışması için toprak ısı değiştiricisinin tasarımına etki eden parametreler aşağıda verilmiştir;

Toprak tipi kumlu,

k_s =2 W/m K,

α_s = 0.000001171 m^2/s

İstanbul için;

$T_{t,ort}$ = 15.85 °C , $T_{h,ort}$ = 15.6 °C;

$T_{t,gen}$ = 10.4 °C , $T_{h,gen}$ = 10.8 °C;

Su, $V_{f,\,max}$ = 20 m^3/saat

PPRC, k_p = 0.46 W/m K

Δx = Δy = 0.1 m , Δz = 1 m (ızgara boyutları), Δt=1800 s (zaman adımı)

Çizelge 4. 3 Simülasyonda kullanılan geometrik parametreler [5]

Simülasyonlar	NPT	P_s (m)	Y (m)	L (m)	D_d/D_i (mm)	Simülasyonlar	NPT	P_s (m)	Y (m)	L (m)	D_d/D_i (mm)	Simülasyonlar	NPT	P_s (m)	Y (m)	L (m)	D_d/D_i (mm)
Sim. 1	20, 30, 40,60	0.5	1	40	32/26	Sim. 21	30	1	2	60,80	32/26	Sim. 41	30	1	2	40	26/21 , 40/32
Sim. 2		0.5	1.5			Sim. 22						Sim. 42					
Sim. 3		0.5	2			Sim. 23						Sim. 43					
Sim. 4		0.5	2.5			Sim. 24						Sim. 44					
Sim. 5		0.5	3			Sim. 25						Sim. 45					
Sim. 6		1	1			Sim. 26						Sim. 46					
Sim. 7		1	1.5			Sim. 27						Sim. 47					
Sim. 8		1	2			Sim. 28						Sim. 48					
Sim. 9		1	2.5			Sim. 29						Sim. 49					
Sim. 10		1	3			Sim. 30						Sim. 50					
Sim. 11		2	1			Sim. 31						Sim. 51					
Sim. 12		2	1.5			Sim. 32						Sim. 52					
Sim. 13		2	2			Sim. 33						Sim. 53					
Sim. 14		2	2.5			Sim. 34						Sim. 54					
Sim. 15		2	3			Sim. 35						Sim. 55					
Sim. 16		3	1			Sim. 36						Sim. 56					
Sim. 17		3	1.5			Sim. 37						Sim. 57					
Sim. 18		3	2			Sim. 38						Sim. 58					
Sim. 19		3	2.5			Sim. 39						Sim. 59					
Sim. 20		3	3			Sim. 40						Sim. 60					

Simülasyon çalışmalarında kullanılan tüm teknik parametreler Çizelge 4.3'de verilmiştir. Birçok farklı simülasyon çalışmaları neticesinde optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Isı pompası çevriminde enerji analizi uygulanarak, her noktanın termodinamik özelliklerinin elde edilişi Çizelge 4.4'te verilmiştir [116]. Çizelge 4.5'te ekonomik analizde kullanılan parametreler listelenmiştir.

Çizelge 4. 4 Isı pompası çevriminde her noktanın analizi

Nokta	Girdiler	Çıktılar
1	$T_1 = T_{evap} + T_{aşırı\ kızdırma}$, $P_1 = P_{evap}$	h_1 and s_1
2	$P_2 = P_{kond}$, s_1 h_1, h_{2s}, $\eta_{komp,izen}$ P_2, h_2	h_{2s} $h_2 = h_1 + (h_{2s} - h_1)/\eta_{komp,izen}$ s_2
3	$P_3 = P_2$, $T_3 = T_{3'} - T_{aşırı\ kızdırma}$,	s_3, h_3
4	$T_4 = T_{evap}$, $h_3 = h_4$	x_4, s_4

Çizelge 4. 5 Ekonomik analizin parametreleri [5]

$T_{kond,h}$=30 °C, 40 °C, 50 °C	$T_{evap,c}$= 5 °C
$T_{evap,h} = (T_{f,i} + T_{f,o})/2$	$T_{kond,c} = (T_{f,i} + T_{f,o})/2$
a_1=10 ₺/m^2	τ_h=2257 h/y
c_{boru}= 1.4 ₺/m for DN25	τ_c=5130 h/y
c_{boru}= 2.1 ₺/m for DN32	$C_{ısıpompası}$=17500 ₺
c_{boru}= 3 ₺/m for DN40	E_{tarife} =0.43 ₺/kW
$C_{işçilik} = (C_{TID} + C_{ısıpompası}) * 0.35$	e=8, 10, 12%
n=10 yıl	$\eta_{komp,isen}$=70%
i=12%	$\eta_{komp,el}$=80%
$\eta_{pompa,el}$=80%	$\eta_{pompa,ise}$=80%

4.3.3 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline Yerleştirilen Isı Değiştirici Borularına ait Simülasyon Çalışması

İstanbul'daki bir alışveriş merkezinin temeline ve temelinin altındaki toprağa, ısı değiştirici borularının yerleştirilmesi durumuyla ilgili bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. TKIP kullanılarak ısıtma ve soğutma yapılacak alışveriş merkezi, tüm yıl boyunca sabah 9:00 akşam 10:00 saatleri arasında çalışmaktadır. Sistem, yıl boyunca ısıtma ve soğutma sezonu için günde toplamda 14 saat çalışmaktadır. Günün geri kalanında çalışmamaktadır. Isıtma sezonunda, sistemin çalıştığı zaman periyotlarında saatte 20 kW'lık bir ısı yükü topraktan veya betondan çekilir ve sisteme aktarılır. Aynı

şekilde, soğutma sezonunda, saatte 20 kW'lık bir ısı yükü toprağa veya betona aktarılır. Bina temelinin üstü kapalı bir alan olduğundan, bina temelinin üst yüzeyinden sadece konveksiyon ve uzun dalga radyasyonu ile ısı transferi meydana gelmektedir.

Isı değiştirici boruları, bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline yerleştirilir. Bu çalışmada, ısı değiştirici borularının yerleştirildiği yer (toprak veya beton), farklı paralel boru sayıları ve farklı gömme derinlikleri için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca, ısıtma sezonunda çeşitli yoğuşma sıcaklıkları (30, 40, 50°C) ve soğutma mevsiminde tek bir buharlaşma sıcaklığı (5°C) alınarak birçok simülasyon çalışması yapılmıştır. Tüm simülasyon çalışmalarında, elektrik fiyatlarındaki artış oranları da dikkate alınmıştır. Özetle, Çizelge 4.6'da gerçekleştirilen tüm simülasyon çalışmaları görülmektedir.

Çizelge 4. 6 Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları

Simülasyonlar	Kurul. yeri	Y-Y_c (m)	Y (m)	Y_c (m)	NPT	Isıtma Sezonu, T_{kond} Soğutma Sezonu, T_{evap}	e
Sim. 1	Toprak	0.2	-	0.75	30	T_{kond} =30, 40, 50°C T_{evap}=5°C	8, 10, 12%
Sim. 2		0.2		0.75	40		
Sim. 3		0.2		0.75	50		
Sim. 4		0.2		0.75	80		
Sim. 5		0.4		0.75	30		
Sim. 6		0.6		0.75	30		
Sim. 7		0.2		0.5	30		
Sim. 8		0.2		1.2	30		
Sim. 9	Beton	-	0.8	1	30		
Sim. 10			0.8	1	40		
Sim. 11			0.8	1	50		
Sim. 12			0.8	1	80		
Sim. 13			0.6	1	30		
Sim. 14			0.95	1	30		
Sim. 15			0.4	0.8	30		
Sim. 16			0.6	0.8	30		
Sim. 17			0.75	0.8	30		

Esasen, bu çalışmada MATLAB'da yazılan kod sayesinde 17 farklı simulasyon çalışması yapılarak on yıllık periyotta bina temelinde ve bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilen ısı değiştirici boruları için akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, ve boru etrafında toprak ve beton sıcaklıkları elde edilmiştir. Ardından, MATLAB'da yazılan yeni bir kodla bu sıcaklıklar girdi parametreleri olarak verilip ısı pompası çevriminde enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışmalarına ek olarak, ısıtma sezonunda 3 farklı

yoğuşma sıcaklığı için yapılmış olup, yani 51 farklı simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, MATLAB'da yazılan kod sayesinde, ısı pompası çevrim analizi 51 farklı simülasyon çalışması için 10 yıllık periyotta yapılarak COP değerleri elde edilmiştir. Isı pompası çevriminde enerji analizi yapıldığında, her bir noktanın termodinamik özelliklerinin nasıl bulunacağı Çizelge 4.4'de adım adım gösterilmiştir.

Aşağıda boru yerleşimi ve simülasyon çalışmalarında kullanılan sıvı, toprak ve boru özelliklerini içeren giriş parametrelerini görülmektedir. Çizelge 4.7'de gösterildiği gibi, ekonomik analizde kullanılan girdi parametreleri listelenmiştir.

Su, $V_{f,toplam}$ = 20 m^3/saat

NPT=30,40, 50,80

k_s =2 W/m K,

k_b =2.5 W/m K,

PPRC, k_p = 0.46 W/m K,

P_s=1 m

L = 40 m

H=20 m

d_o/d_i =32/26mm

Δx = Δy = 0.05 m , Δz = 1 m, Δt=1800

Çizelge 4. 7 Ekonomik analizde girdi parametreleri

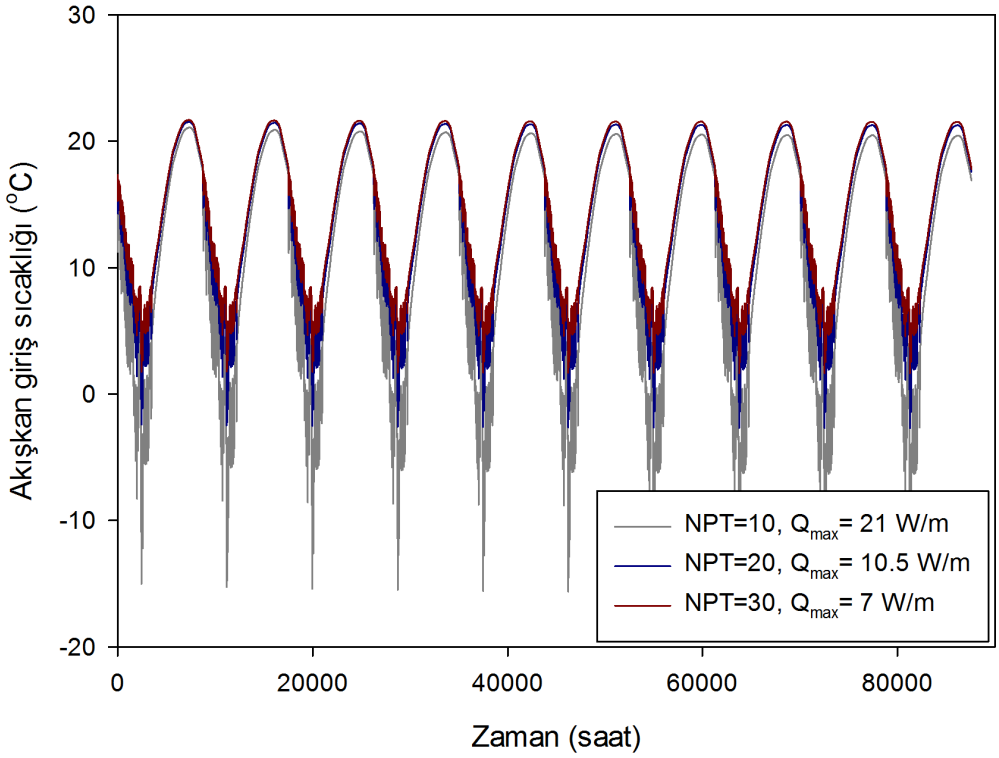
$T_{kond,h}$=30 °C, 40 °C, 50 °C	$T_{evap,c}$= 5 °C
$T_{evap,h}$= ($T_{f,i}$ +$T_{f,o}$)/2	$T_{kond,c}$=($T_{f,i}$ +$T_{f,o}$)/2
a_1=10 ₺/m^2	τ_h=2310 h/y
$C_{ısı\ pompası}$=20000 ₺	τ_c=2800 h/y
C_{boru}= 2.1 ₺/m for DN32	$C_{ısıpompası}$=17500 ₺
$C_{işçilik}$= (C_{TID}+$C_{ısıpompası}$)*0.35	E_{tarife} =0.43 ₺/kWh
e=8, 10, 12%	n=10 yıl
$\eta_{komp,isen}$=70%	i=12%
$\eta_{komp,el}$=80%	$\eta_{pompa,ise}$=80%
$\eta_{pompa,el}$=80%	

4.4 Sonuçlar

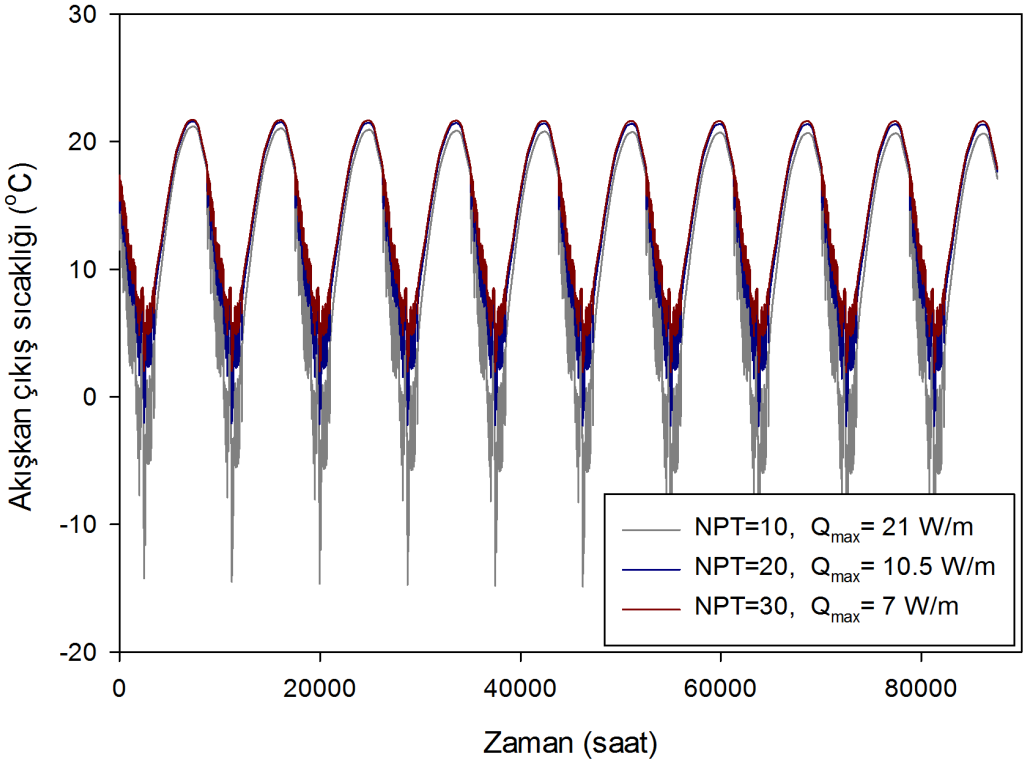
4.4.1 Isıtma Sezonunun Simülasyon Sonuçları

Toprağa gömülü borulardan akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarını ve toprak sıcaklıklarını belirlemek için ısıtma sezonunda uzun zamanlı simülasyon çalışması yapılmıştır. Yıllık ısıtma yükleri HAP programı kullanılarak hesaplanmış ve iklim verileri meteorolojiden alınmıştır. 10 Kasım ile 3 Nisan arasında binanın maksimum ısıtma yükü ihtiyacı 8.4 kW olup, yılın kalan zamanlarında TKIP sistemi çalıştırılmamaktadır.

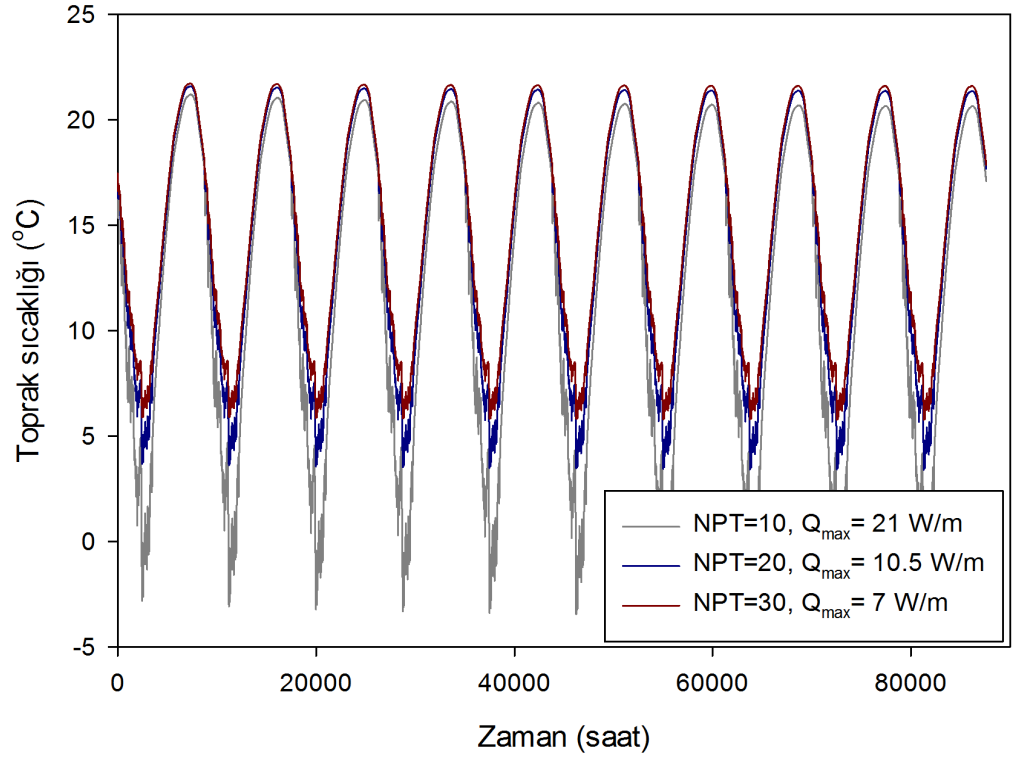
Birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine yani farklı paralel boru sayılarına (NPT) göre 10 yıllık zaman diliminde akışkan giriş, çıkış sıcaklığı ve toprak sıcaklığının değişimleri incelenmiştir (Şekil 4.16, 4.17, 4.18).



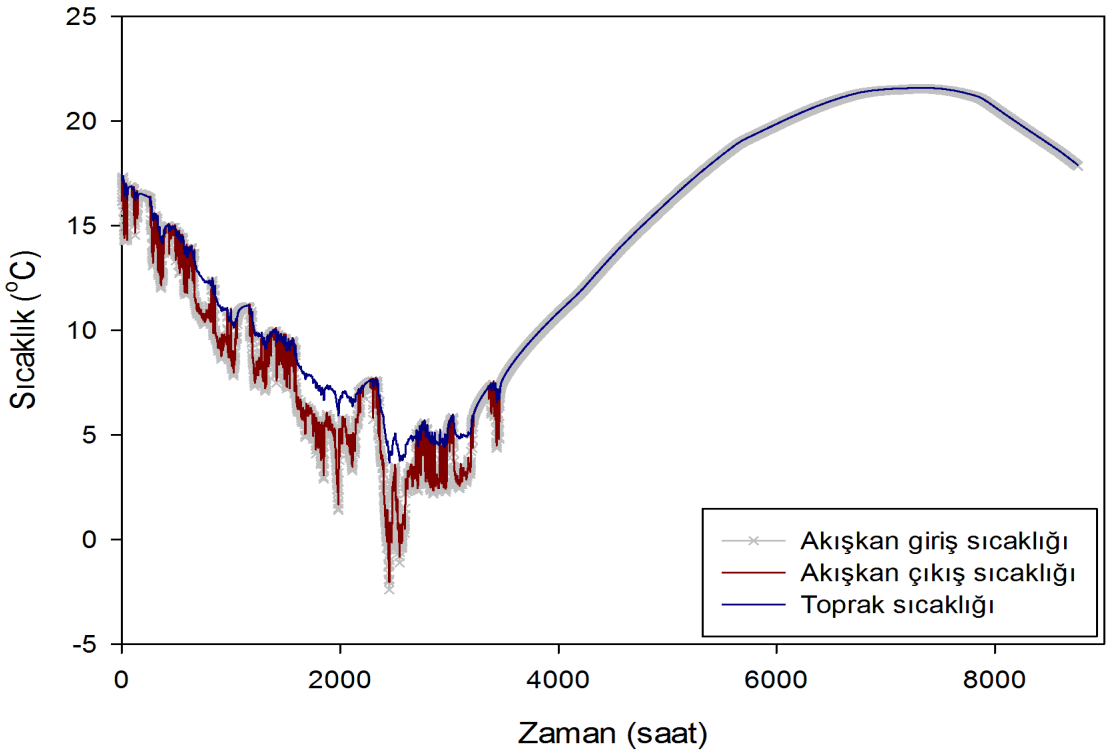
Şekil 4. 16 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



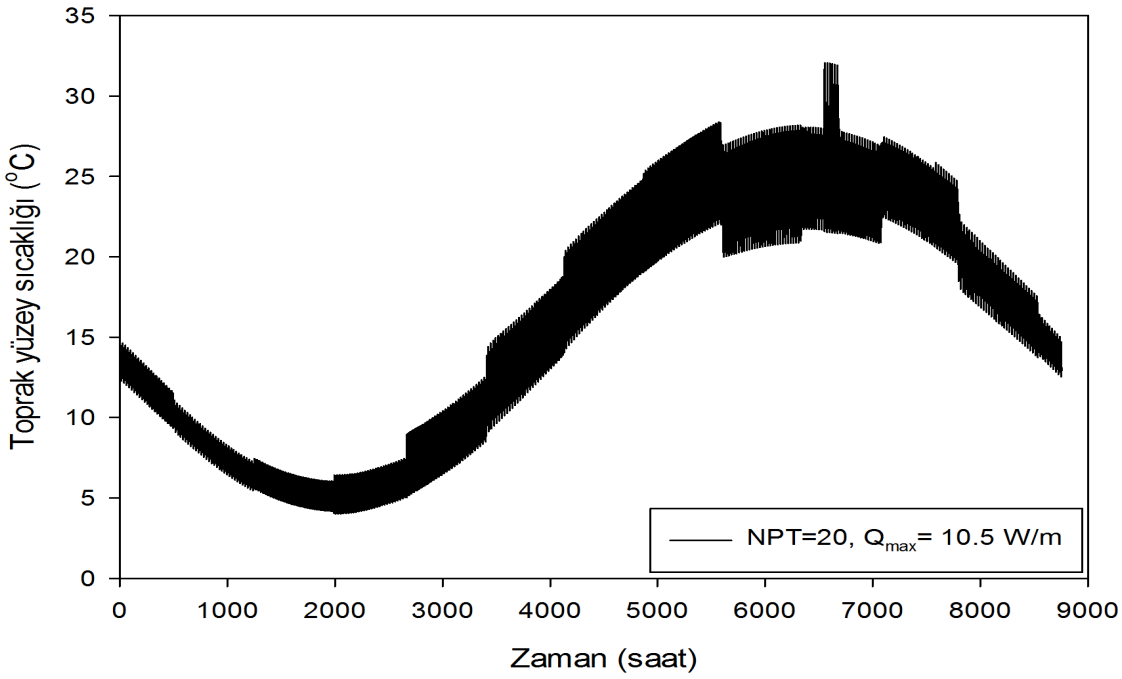
Şekil 4. 17 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



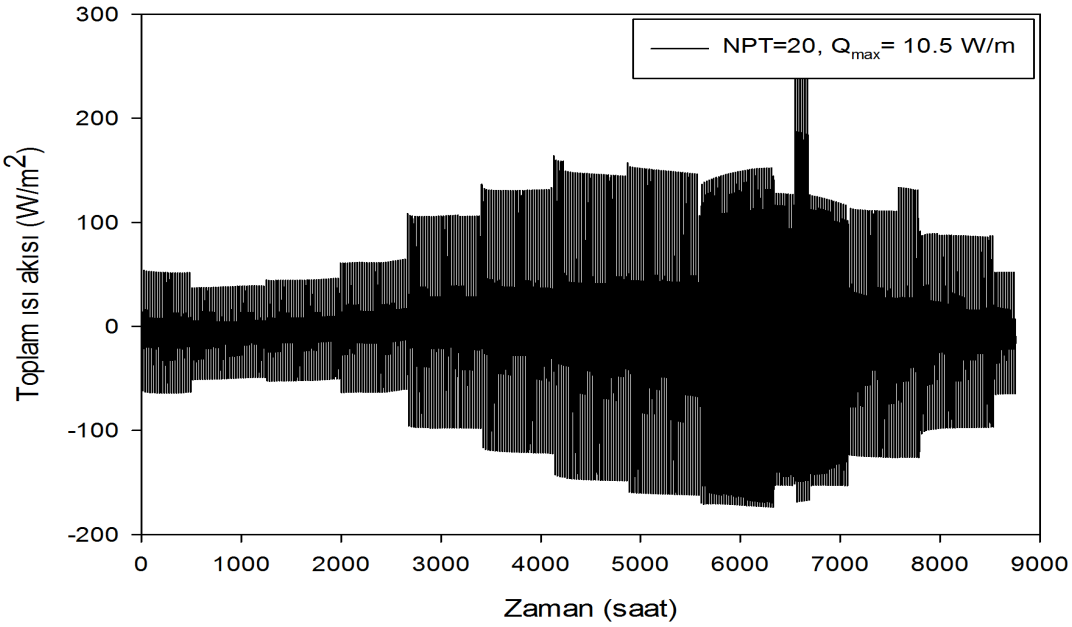
Şekil 4. 18 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre toprak sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 4. 19 Birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda giriş, çıkış ve toprak sıcaklığının zamana göre değişimi



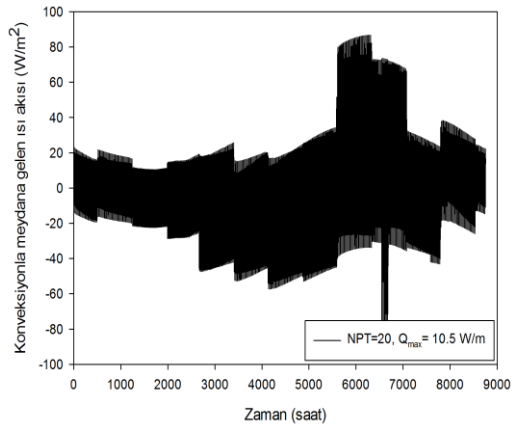
Şekil 4. 20 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda toprak yüzey sıcaklığının yıllık zamana göre değişimi



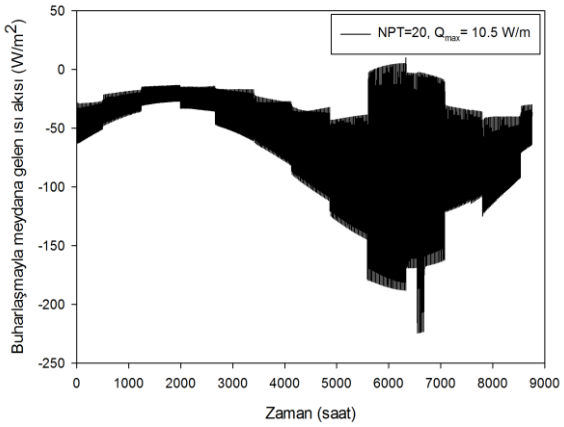
Şekil 4. 21 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda toprak yüzeyinde meydana gelen toplam ısı akısı miktarının yıllık zamana göre değişimi

Akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimine baktığımızda sistemin çalıştırılmadığı zamanlarda (off-season) akışkan yokmuş gibi yani sadece toprak varmış gibi çözüm yapıldığından ve bu aylarda soğutma ihtiyacı olan aylar olduğundan, toprak sıcaklığı artmıştır (Şekil 4.18). Ofisin ısıtma sezonu boyunca farklı ısı yüklerine göre saatlik olarak elde edilen akışkan giriş sıcaklığı, Şekil 4.16'da görüldüğü üzere topraktan çekilen 21 W/m (Sim. 1-12) için en düşük -13.5 °C olurken, 7 W/m (Sim. 25-36) için en düşük 2°C olmaktadır.

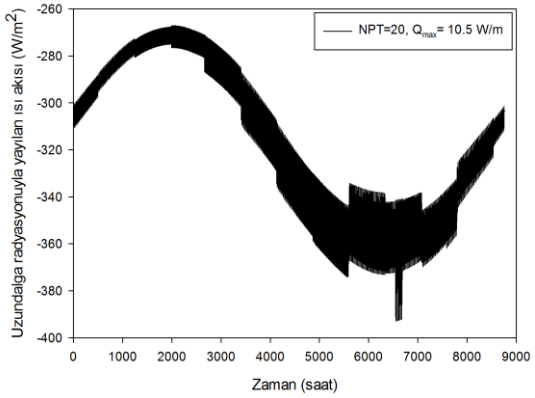
Maksimum ısıtma yükünün olduğu yerde ve toprakta birim boru boyundan fazla yük çekildiğinde (21 W/m) minimum akışkan giriş sıcaklığı elde edilmektedir. Isıtma sezonunda, yüksek akışkan giriş sıcaklığı TKIP sistemleri için daha uygundur (Sim. 25-36). Akışkan giriş sıcaklığına göre hesaplanan akışkan çıkış sıcaklığı Şekil 4.17'de görülmektedir. Akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıklarını daha net görebilmesi için 1 yıllık periyotta NPT= 20 için değişimleri Şekil 4.19'da görülmektedir.



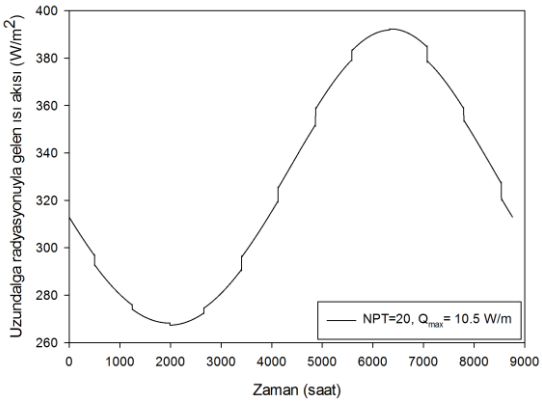
(a)



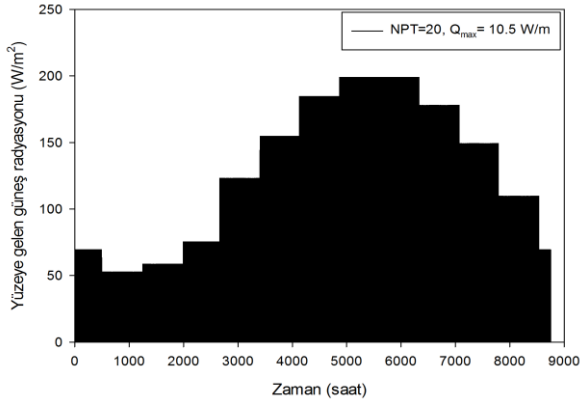
(b)



(c)



(d)

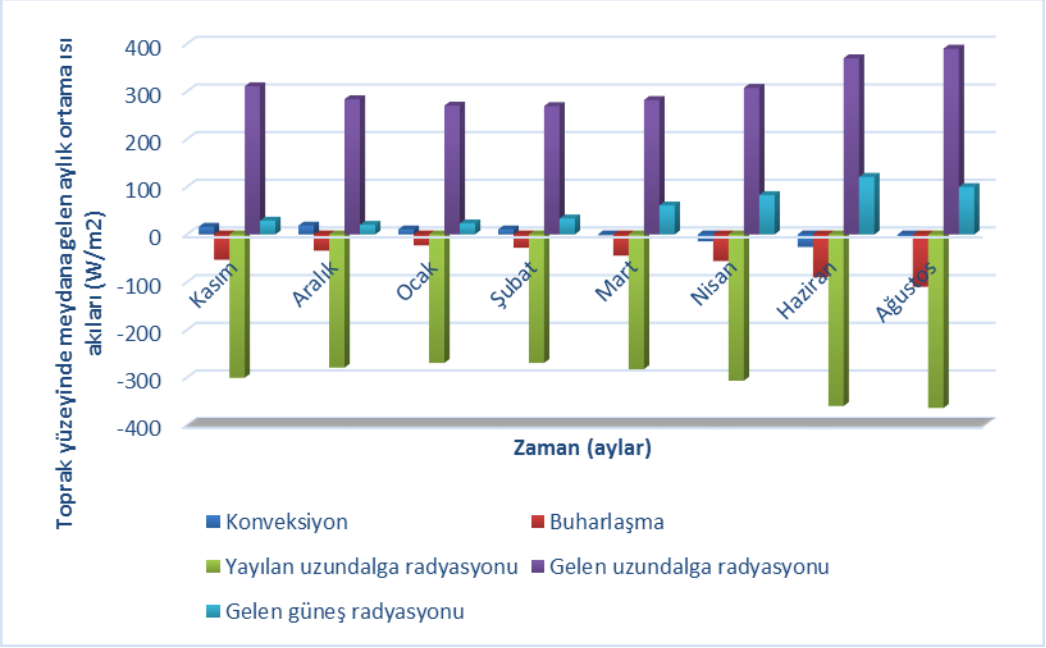


(e)

Şekil 4. 22 Toprağın yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı zamanla değişiminin görünümü, Taşınım(a), Buharlaşma(b), Güneş radyasyonu(c), Yayılan uzun dalga(d), Gelen uzun dalga radyasyonu(e)

Birim boru boyundan çekilen ısı miktarı 10.5 W/m olan toprak durumunun simülasyonunu ele aldığımızda yıl boyunca toprak yüzey sıcaklığının sinüzoidal olarak değiştiği Şekil 4.20'de görülmektedir. Buna bağlı olarak toprak yüzeyinde meydana gelen toplam ısı akısı miktarının zamanla değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir.

Şekil 4.22'de görüldüğü üzere yıllık toprak yüzeyinden meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı değişimi verilmiştir. Y=2 m ve P_s=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m topraktan ısı çekilmesi durumunda ayrı ayrı konveksiyondan, buharlaşmadan, gelen ve giden uzun dalga radyasyonundan ve gelen güneş radyasyonundan dolayı oluşan ısı akılarının yıllık olarak zamanla değişimi görülmektedir. Pozitif değerler çevreden toprağa doğru olan ısı akılarını gösterirken negatif değerler topraktan çevreye olan ısı akılarını göstermektedir. Güneş ışınımı ve daha uzun güneşlenme süreleri nedeniyle yüzeydeki ısı akısının günlük değişimi yaz günlerinde kış günlerinden daha yüksektir (Şekil 4.21). Yüzeyden konveksiyon ve buharlaşmayla olan ısı akısı yüzey sıcaklığına bağlıdır ve dolayısıyla konveksiyon ve buharlaşmadan dolayı yüzey ısı akısının değişim genliği, güneş radyasyonunun neden olduğu yaz günlerinde daha yüksektir (Şekil 4.22a ve 4.22b).



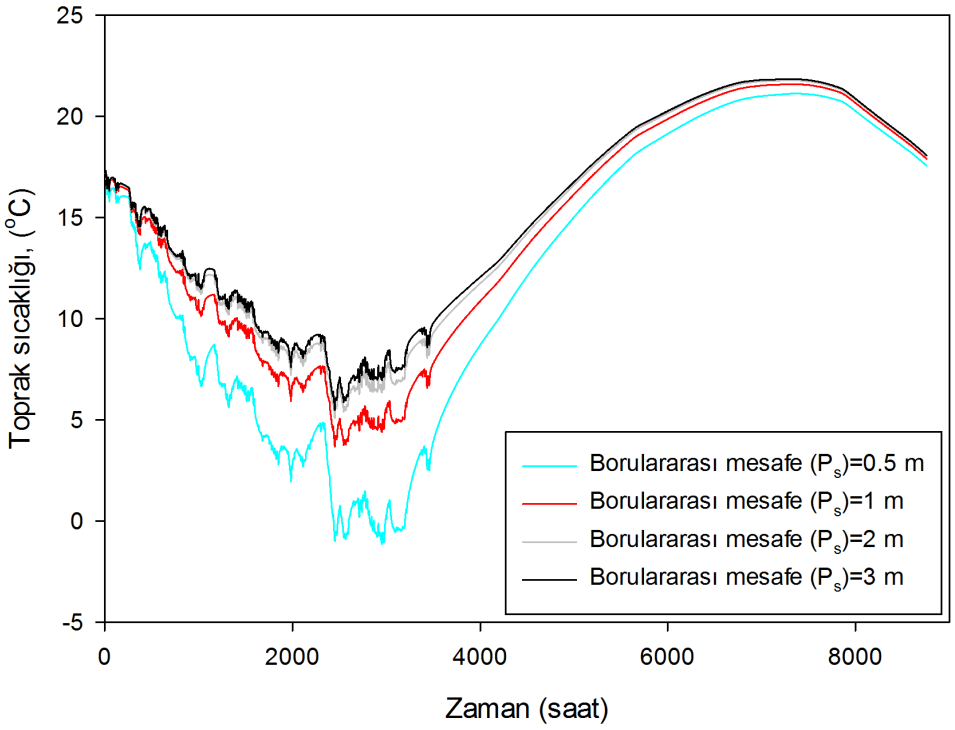
Şekil 4. 23 Toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı etkilerinin aylık olarak değişimlerinin görünümü

Ayrıca, bağıl nemin etkileri, Şekil 4.22b'de buharlaşmadan dolayı olan ısı akısı üzerinde görülebilir. Yüzeyde güneş radyasyonuyla meydana gelen ısı akısının zamanla Şekil

4.22e'de görüldüğü gibi değişiminin nedeni, meteorolojiden alınan her ay için sabit güneş radyasyonu verdiğimizden dolayı merdiven şeklinde oluşmuştur.

Şekil 4.23'de yüzeyde meydana gelen toprak ısı akılarının bireysel etkileri görülmektedir. Gelen ve yayılan ısı radyasyonları diğer yüzey etkilerine göre birim alanda ortalama ısı akısı değeri fazla olduğu ancak net etkilerinin fazla olmadığı görülmüştür. Şekil 4.23'de görüldüğü üzere toprak yüzey ısı akıları arasında en önemli etkisi olanlar buharlaşma ve güneş radyasyonudur.

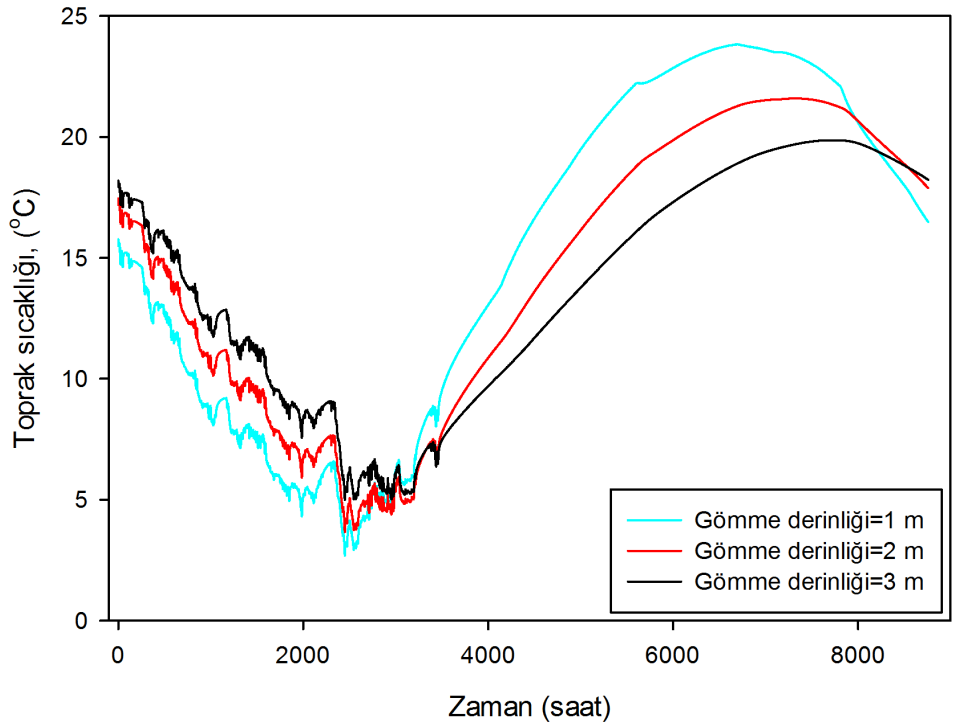
Şekil 4.24'te gömme derinliği 2 m olan ve toprak içerisinde birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda borular arası mesafenin 0.5 m olduğunda toprak sıcaklığının belirgin bir şekilde düştüğü görülmektedir. Borular arası mesafenin 1 m'den daha büyük olduğu durumlarda toprak sıcaklığındaki değişim fazla olmamakta, 2 m ve 3 m olması durumunda ise toprak sıcaklığı oldukça az değişim göstermektedir.



Şekil 4. 24 Y=2 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda farklı borulararası mesafelerin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi

Şekil 4.25'da görüldüğü üzere, simülasyonun başında, sabit bir boru aralığı (P_s = 1 m) için, toprak sıcaklığı gömme derinliği ile artmaktadır. 3000 saatlik simülasyon sonrasında, toprağın sıcaklığı tüm gömme derinliklerinde hemen hemen eşit olur ve sonra yılın geri

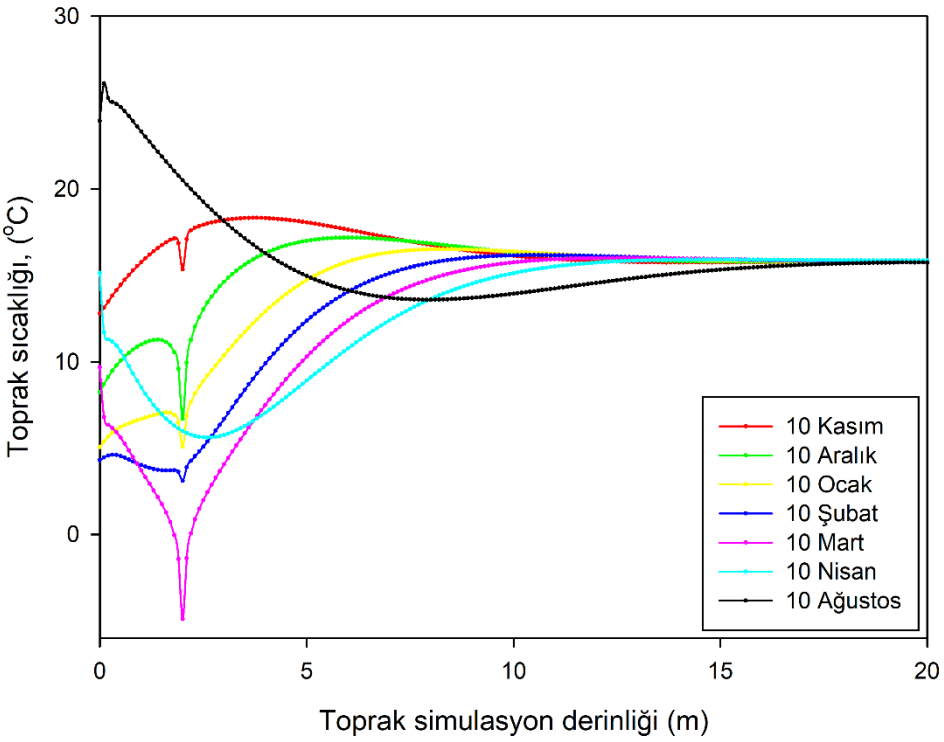
kalanında mevsimsel yüzey etkilerinden dolayı maksimuma yükselir ve yine mevsimsel etkilerden dolayı tekrar azalır (Şekil 4.25). Ayrıca, gömme derinliği 3 m olan simülasyonda toprak sıcaklığının, ısıtma sezonunun sonunda en düşük sıcaklık olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, yüzeyde meydana gelen iklim değişikliklerinin o derinliğe daha geç ulaşmasıdır. Yani, gömme derinliği 1 m'de, boru yüzeye yakın olduğundan mevsimsel yüzey etkilerinden çok hızlı etkilenmektedir.



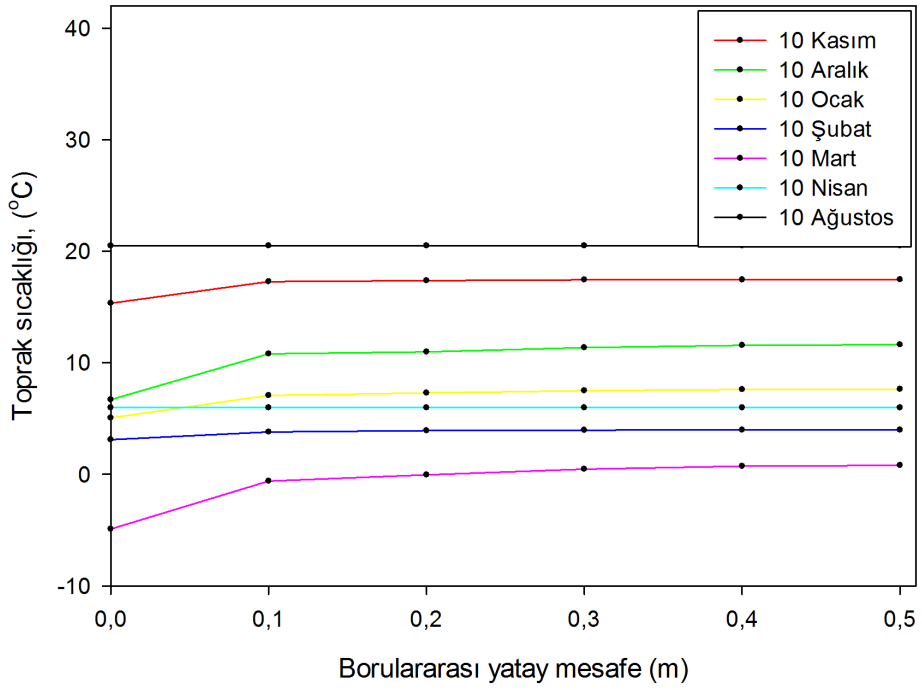
Şekil 4. 25 Ps=1 m'de birim boru boyundan 10.5 W/m ısı çekilmesi durumunda farklı gömme derinliğinin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi

Şekil 4.26a'da görüldüğü üzere, toprak sıcaklığının ısıtma sezonunda (10 Kasım-3 Nisan) topraktaki dikey simülasyon derinliği (20 m) boyunca 1 yıllık değişimi verilmiştir. Borular 2 m derinliğe gömülmüş olduğundan ve topraktan ısı çekildiğinden dolayı dikey simülasyon derinliğinin 2 m olduğu yerde sıcaklık en düşük olmuştur. Her yıl topraktan Kasım ayında ısı çekilmeye başlanarak Mart ayının sonlarına kadar devam etmekte ve bu durum Kasım ayından Mart ayının sonuna kadar sürekli toprak sıcaklığının azaldığı Şekil 4.26a'da görülmektedir. Ağustos ve Nisan aylarında ise sistem çalışmadığından ve yüzey etkilerinden dolayı, yüzeyde toprak sıcaklığı fazla, belirli derinliklere kadar inildikçe

toprak sıcaklığı düşmekte ve bu düşüşün herhangi başka bir etkisi olmadan sadece mevsimsel etkilerden kaynaklı toprak derinliğiyle değiştiği görülmektedir.



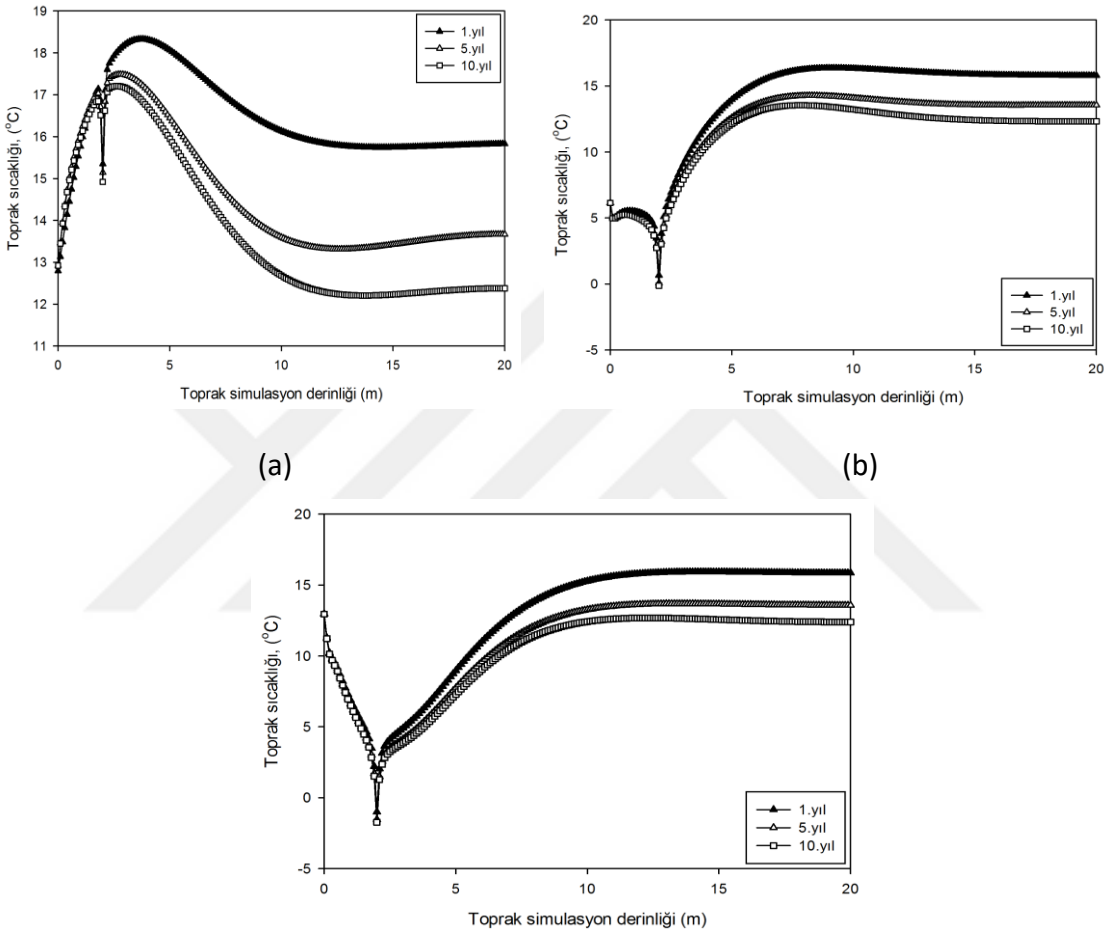
(a)



(b)

Şekil 4. 26 Birim boru boyundan çekilen Q̇max =21 W/m için yılın farklı aylarında toprak sıcaklığının dikeyde (a) ve yatayda (b) değişimleri

Şekil 4.26b‘de görüldüğü üzere, ısıtma sezonunda (10 Kasım-3 Nisan) farklı aylara göre gömülü boru etrafındaki toprak sıcaklığının yataydaki değişimi incelenmiştir. Şekil 4.26b’de, x=0 noktası boru merkezini, x=0.5 noktası ise iki boru arasının ortasını göstermektedir. Isıtma sezonunda topraktan ısı çekildiğinde, x=0 noktasında sıcaklık en düşükken, borunun merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık artmaktadır. Isı çekilmediğinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir (Ağustos ve Nisan ayları).

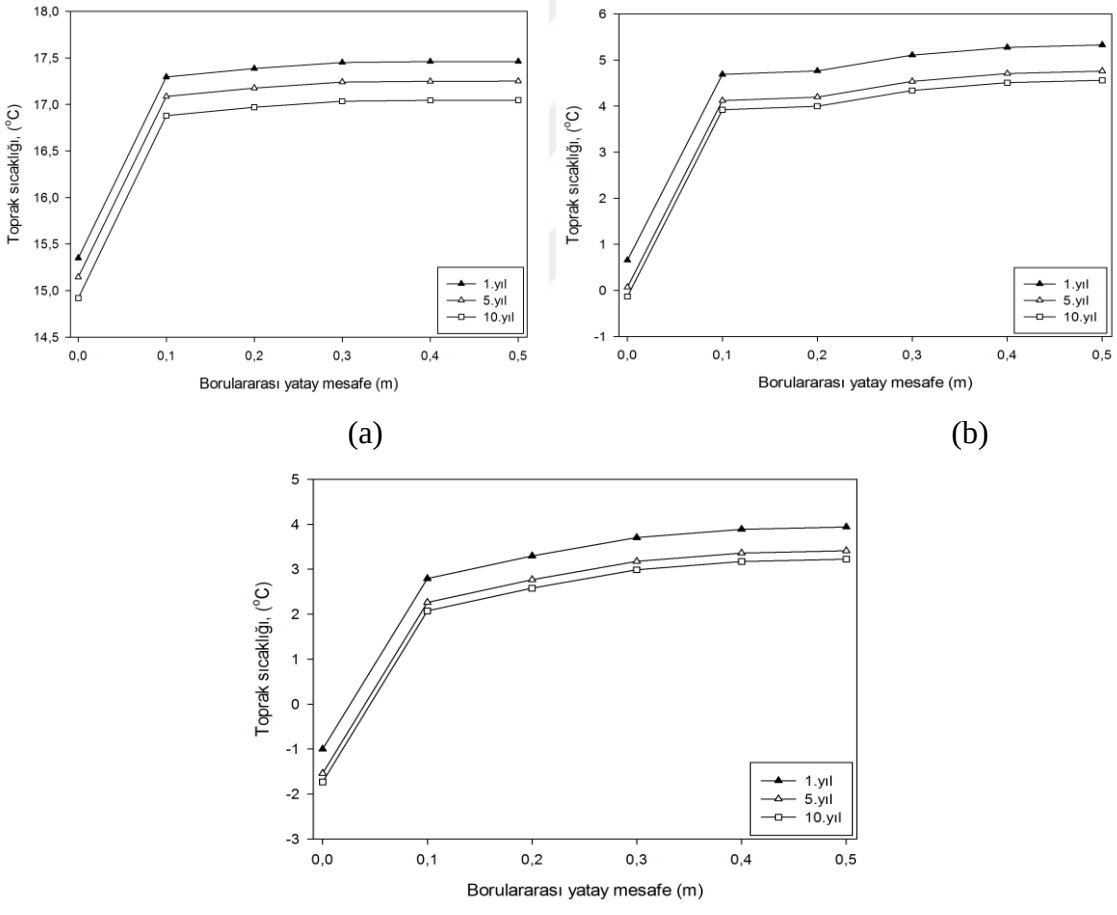


Şekil 4. 27 Toprak sıcaklığının ısıtma sezonunun başlangıcı (a), ortası (b), bitişi (c)’nin yıllara göre dikey olarak değişimi

Isıtma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, toprak simülasyon derinliği boyunca toprağın sıcaklık dağılımının değişimi Şekil 4.27'de verilmektedir. Topraktan ısı çekildiğinden dolayı borunun bulunduğu yerde (Y=2 m) toprak sıcaklığı en düşüktür. Ayrıca, birinci yılın ısıtma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı sırasıyla 16.40 ^{o}C, 13.93 ^{o}C ve 12.71 ^{o}C olarak elde edilmiştir.

Benzer şekilde, onuncu yılda ısıtma sezonunun başında, ortasında ve sonunda çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı sırasıyla 13.74 ^{o}C, 11.36 ^{o}C ve 10.26 ^{o}C olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TKIP kullanılarak sistem çalıştırıldığında, 10 yıllık ısıtma periyodunun sonunda, çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı Q_{max} = 21 W/m (NPT=10, Y=2 ve P_s = 1 m) için yaklaşık 2.5 ^{o}C düştüğü bulunmuştur (Şekil 4.27a, 27b ve 27c). Eğer birim boru boyundan daha fazla ısı çekilirse (Q_{max} = 50 W/m gibi), ortalama toprak sıcaklığı daha da düşecektir.

Şekil 4.28'de, Y = 2 m ve P_s = 1 m'de Q_{max} = 21 W/m için birinci, beşinci ve onuncu yılın başında, ortasında ve sonunda yatay toprak sıcaklık dağılımının değişimini göstermektedir. Topraktan ısı çekilmesinden dolayı, boru etrafındaki toprak sıcaklığı en düşük olurken, borudan yatay olarak uzaklaştıkça sıcaklık artmaktadır.



Şekil 4. 28 Toprak sıcaklığının ısıtma sezonunun başlangıcı(a), ortası(b), bitişi(c)'nin yıllara göre yatay olarak değişimi

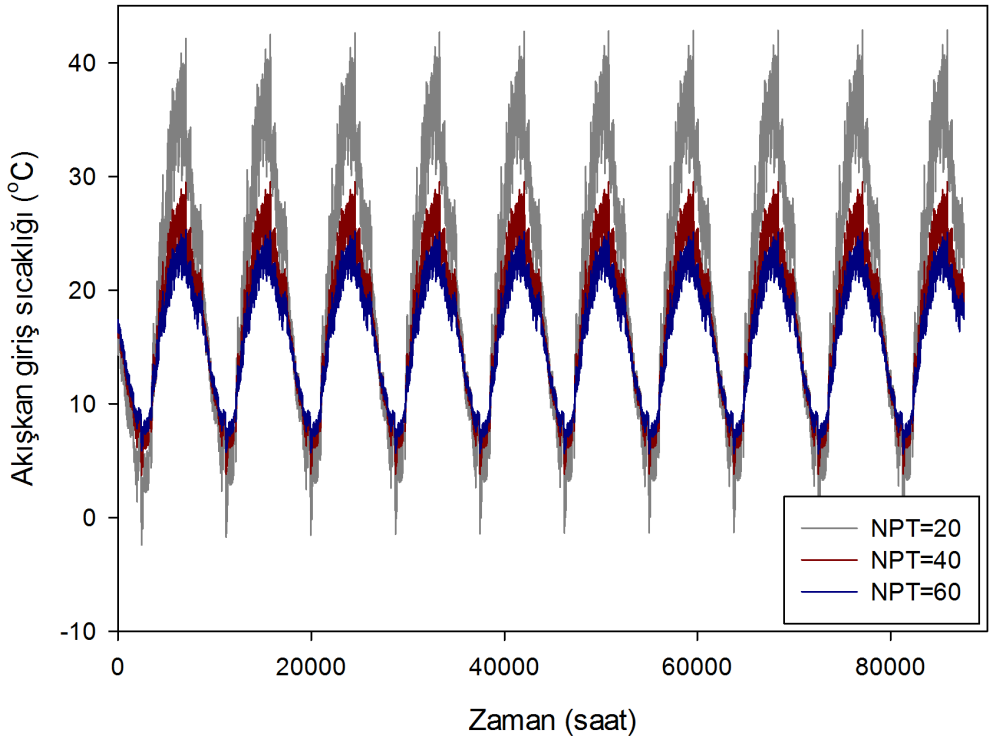
Şekil 4.28a, 28b ve 28c'de görüldüğü gibi, ilk yılın ısıtma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, boru etrafındaki toprağın sıcaklığı sırasıyla 15.35 ^{o}C, 0.65 ^{o}C ve -1.01 ^{o}C olarak bulunmuştur. Ayrıca, onuncu yılın ısıtma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, boru çevresindeki toprak sıcaklığının sırasıyla 14.92 ^{o}C, -0.13 ^{o}C ve -1.73 ^{o}C olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, TKIP kullanılarak sistem çalıştırıldığında, 10 yıllık ısıtma periyodunun sonunda, boru etrafındaki toprak sıcaklığının Q_{max} = 21 W/m (NPT=10, Y=2 ve P_s = 1 m) için yaklaşık 0.7 ^{o}C düştüğü bulunmuştur (Şekil 4.28a, 28b ve 28c). Bu düşüşün az olmasının nedeni, ısıtma sezonunda çalışarak yılın kalan zamanlarında yani yaz aylarında çalışmadığından, toprak yüzeyinde meydana gelen iklimsel değişiklikler boru çevresindeki toprak sıcaklığını etkilemesinden dolayıdır.

Q_{max} = 21 W/m (NPT=10, Y=2 ve P_s = 1 m) için 5 yıllık simülasyonun sonunda toprak sıcaklığı profili sürekli periyodik hale gelir (Şekil 4.27b ve 27c). TKIP sistemlerinin uzun süre çalıştırılması durumunda, sürekli periyodik toprak sıcaklık profili oldukça önemlidir. TKIP sisteminin toprak ısı değiştiricisinin boyutsal tasarımında özellikle borular arası mesafe ve gömme derinliği gibi tasarım parametreleri sürekli periyodik toprak sıcaklık profiline göre belirlenmelidir. Isıtma sezonunun beşinci ve onuncu yıllarının ortası ve sonunda toprak sıcaklık profilleri hemen hemen aynıdır (Şekil 4.27b ve 27c). Aynı durum, Şekil 4.28b ve 28c'de de görülebilir.

4.4.2 Isıtma ve Soğutma Sezonunun Simülasyon Sonuçları

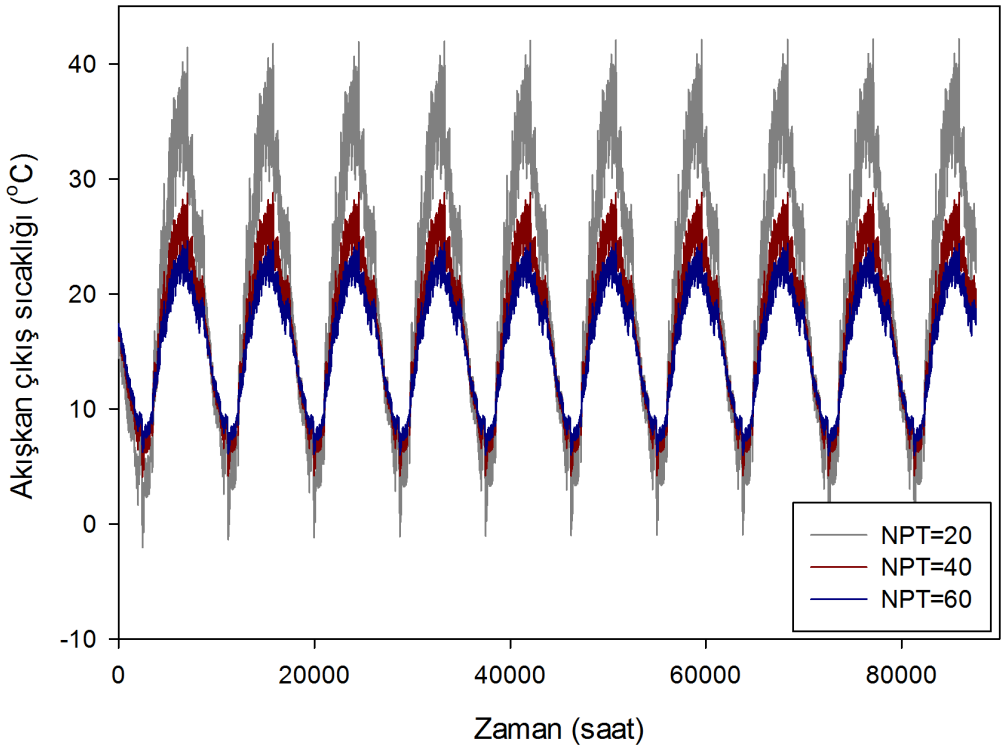
Birim boru boyunca topraktan çekilen ya da toprağa bırakılan farklı ısı yüklerine yani farklı paralel boru sayılarına (NPT) göre 10 yıllık zaman diliminde akışkan giriş, çıkış sıcaklığı ve toprak sıcaklığının değişimini ve toprak yapısının durumu incelenmiştir (Şekil 4.29, 4.30, 4.31). Isıtma sezonunda paralel boru sayısı arttıkça akışkan giriş sıcaklığı artmakta, soğutma sezonunda ise paralel boru sayısı arttıkça azalmaktadır. Şekil 4.29 ve 4.30'de görüldüğü üzere, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları paralel boru sayısı arttıkça ısıtma sezonunda artmakta, soğutma sezonunda ise azalmaktadır. Aynı şekilde Şekil 4.31'da, gömülü borular etrafında ortalama toprak sıcaklığının, paralel boru sayısı arttıkça ısıtma sezonunda artmakta, soğutma sezonunda ise azalmaktadır. NPT= 20 olduğunda, en düşük akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları ısıtma sezonunda sırasıyla, yaklaşık -2°C ve -1.5°C, soğutma sezonunda ise en yüksek sırasıyla, yaklaşık 42°C ve 41.5°C'dir.

Toprak sıcaklığı değişiminin genliği NPT=60 için 13 °C iken, NPT=20 için 25 °C olmaktadır. Aynı zamanda, yıllık ortalama toprak sıcaklığı NPT=60 için 14.5 °C iken, NPT=20 için 16.5 °C'dir.

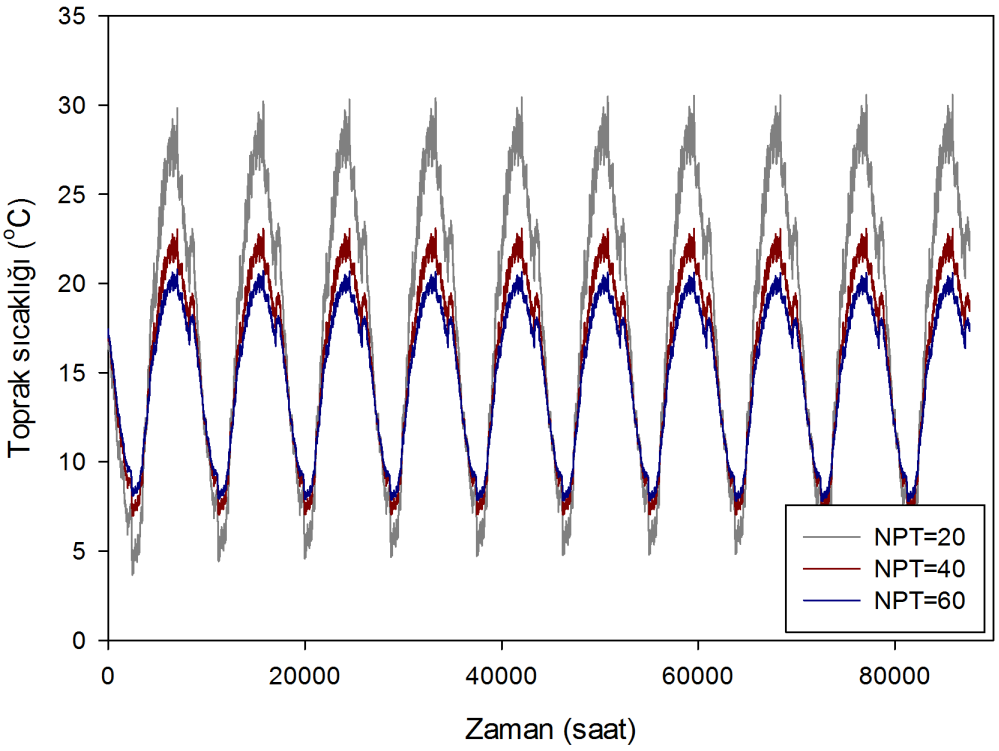


Şekil 4. 29 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan giriş sıcaklığının zamana göre değişimi

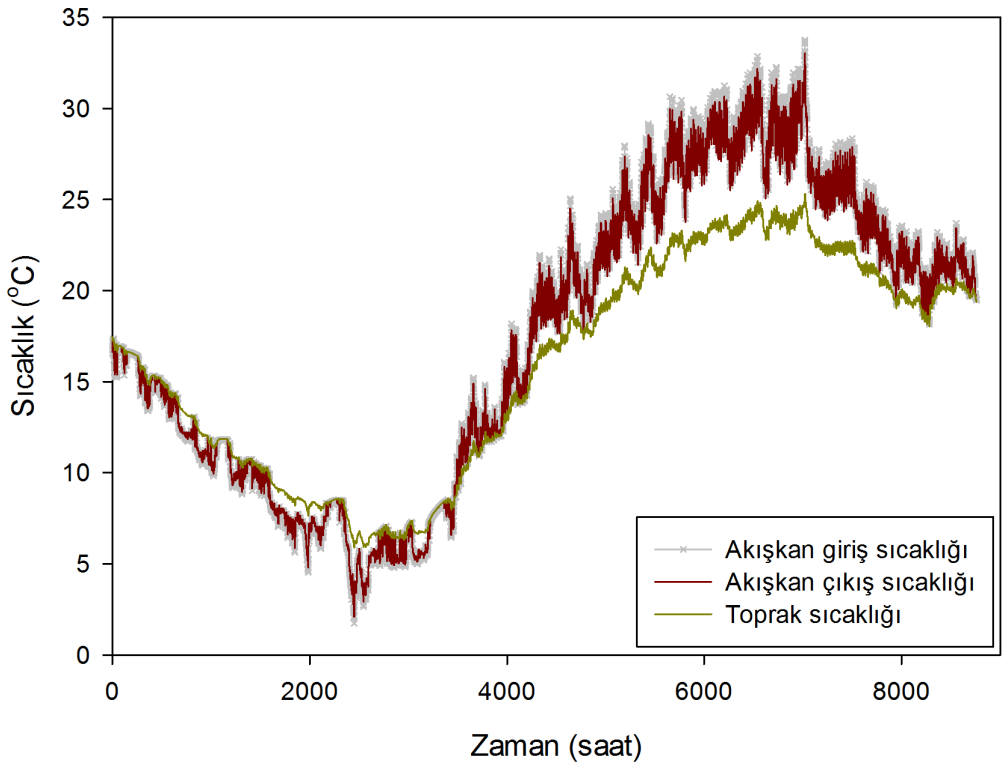
Ek olarak, Şekil 4.29, 4.30, 4.31'de akışkan giriş, çıkış sıcaklığı ve toprak sıcaklığının zamanla özellikle 1.yılda ve daha sonraki yıllarda da arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, şartlandırılacak mahallin soğutma yükü ısıtma yükünden daha fazla olması ve ısıtma sezonundaki çalışma süresi, soğutma sezonundaki çalışma süresinden daha az olmasından dolayı, toprak sıcaklığı devamlı artmaktadır. Akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıklarını daha net görebilmesi için 1 yıllık periyotta NPT= 30 için değişimleri Şekil 4.32'de görülmektedir.



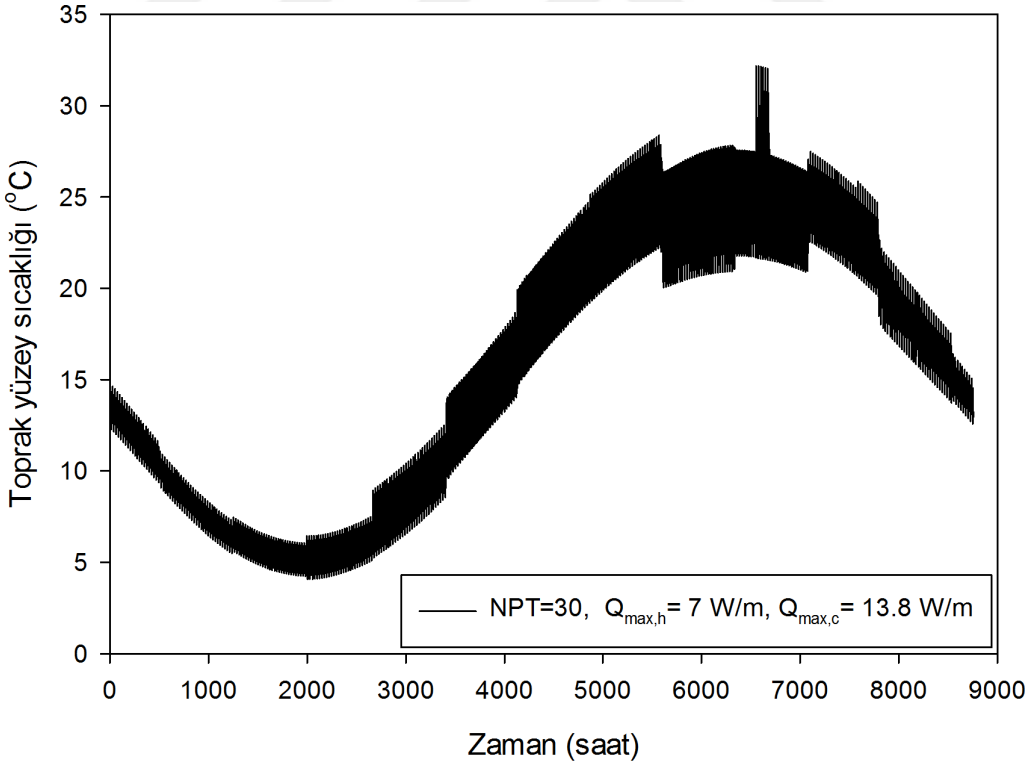
Şekil 4. 30 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre akışkan çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 4. 31 Y=2 m ve Ps=1 m'de birim boru boyundan çekilen farklı ısı yüklerine göre toprak sıcaklığının zamana göre değişimi



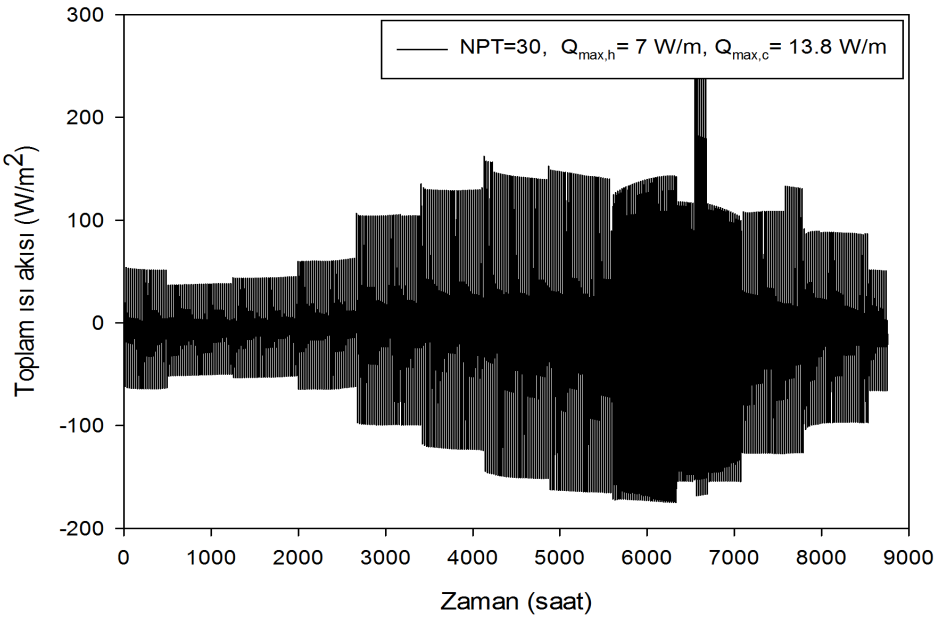
Şekil 4. 32 NPT= 30 için akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 4. 33 Y=2 m ve Ps=1 m'de NPT=30 için toprak yüzey sıcaklığının saatlik zamana göre değişimi

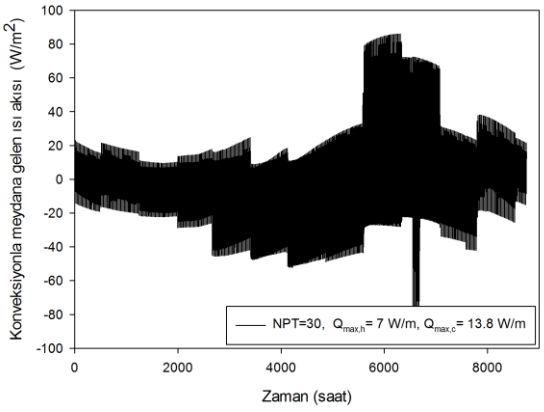
Şekil 4.33'de saatlik toprak sıcaklığı sinüzoidal olarak değiştiği görülmekte ve toprak yüzey sıcaklığının günlük değişimi yaz sezonunda yüksek, kış sezonunda düşük olmaktadır. Yüzeyde meydana gelen toplam ısı akısının yıllık değişimi ve toplam ısı akısına etki eden tüm ısı akılarının bireysel etkileri Şekil 4.34 ve 4.35'de verilmiştir.

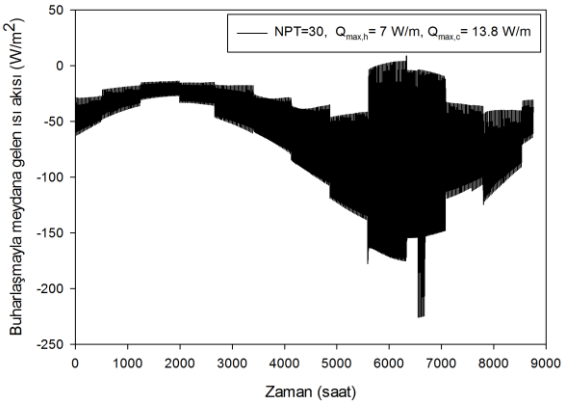
Ek olarak, toprak yüzeyinde tüm yıl boyunca meydana gelen tüm ısı akılarını karşılaştırılabilmek amacıyla ayrı ayrı etkileri aylık ortalama olarak Şekil 4.36'da verilmiştir. Uzun dalga radyasyonlarının gelen ve yayılan olarak meydana geldiğinden net etki fazla olmamaktadır. Yüzey ısı akısına en önemli katkıyı sırasıyla güneş radyasyonu, buharlaşma ve konveksiyondur. Özellikle yaz aylarında buharlaşma ile meydana gelen ısı akısında önemli bir artış gözlenmektedir.



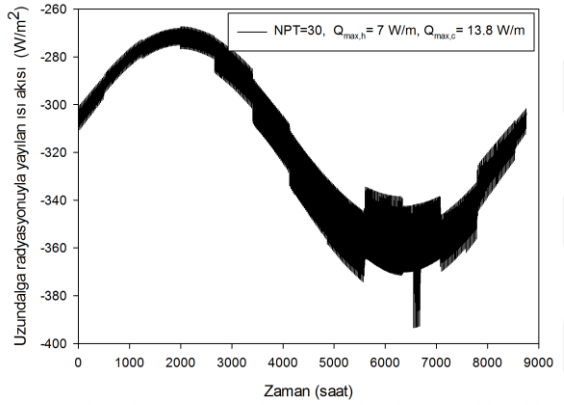
Şekil 4. 34 Y=2 m ve Ps=1 m'de NPT=30 için toprak yüzeyinde meydana gelen toplam ısı akısı miktarının saatlik zamana göre değişimi

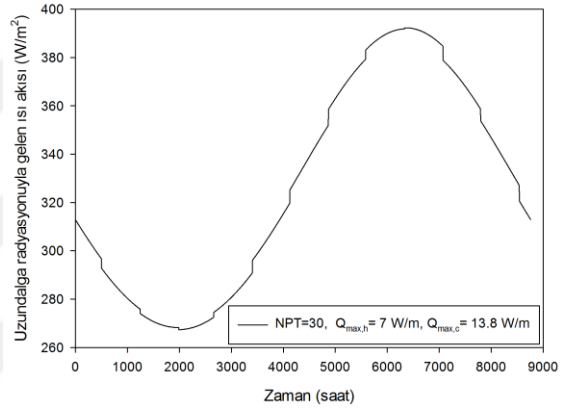
Toprak ısı değiştiricisinin en önemli tasarım parametreleri gömme derinliği ve borulararası mesafedir. Gömme derinliği ve borulararası mesafenin toprak sıcaklığına etkisi Şekil 4.37 ve 4.38'de verilmiştir. Gömme derinliği arttıkça, toprak sıcaklığı daha kararlı bir hale gelmekte ve ısıtma sezonunda en yüksek, soğutma sezonunda ise en düşük sıcaklığa sahip olmaktadır.



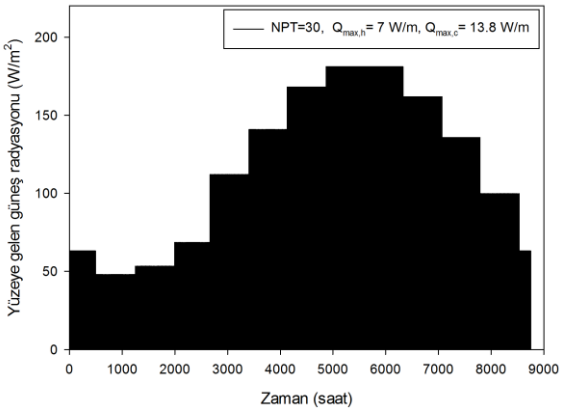


(a) (b)



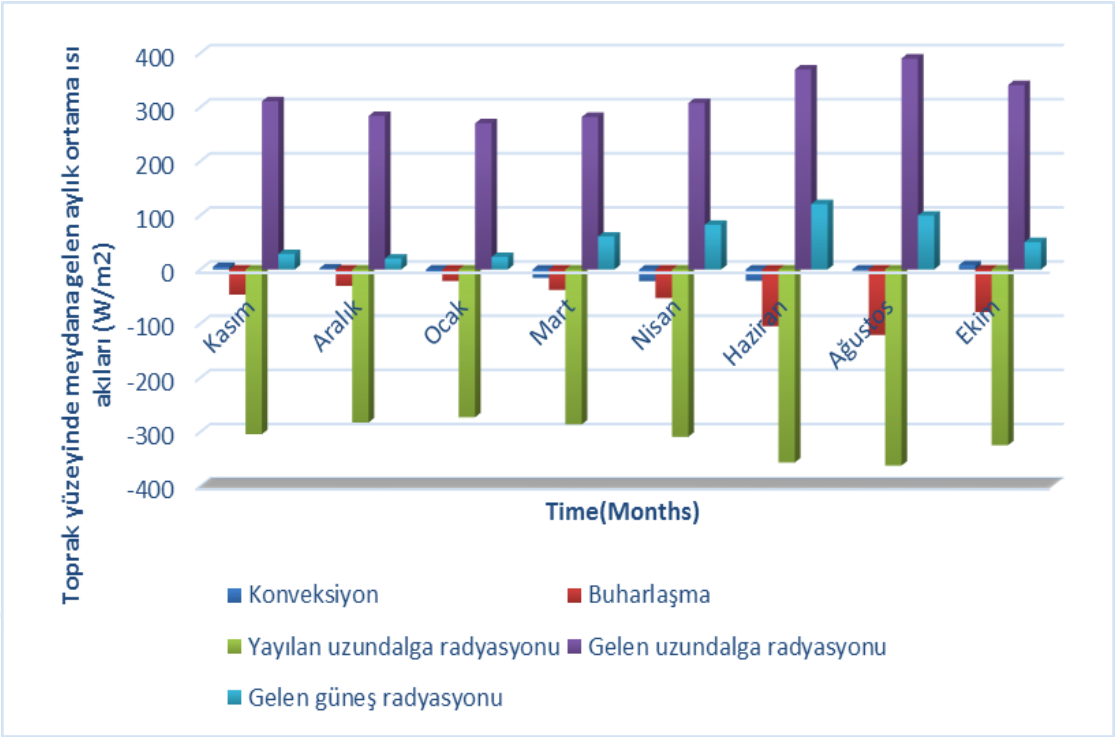


(c) (d)

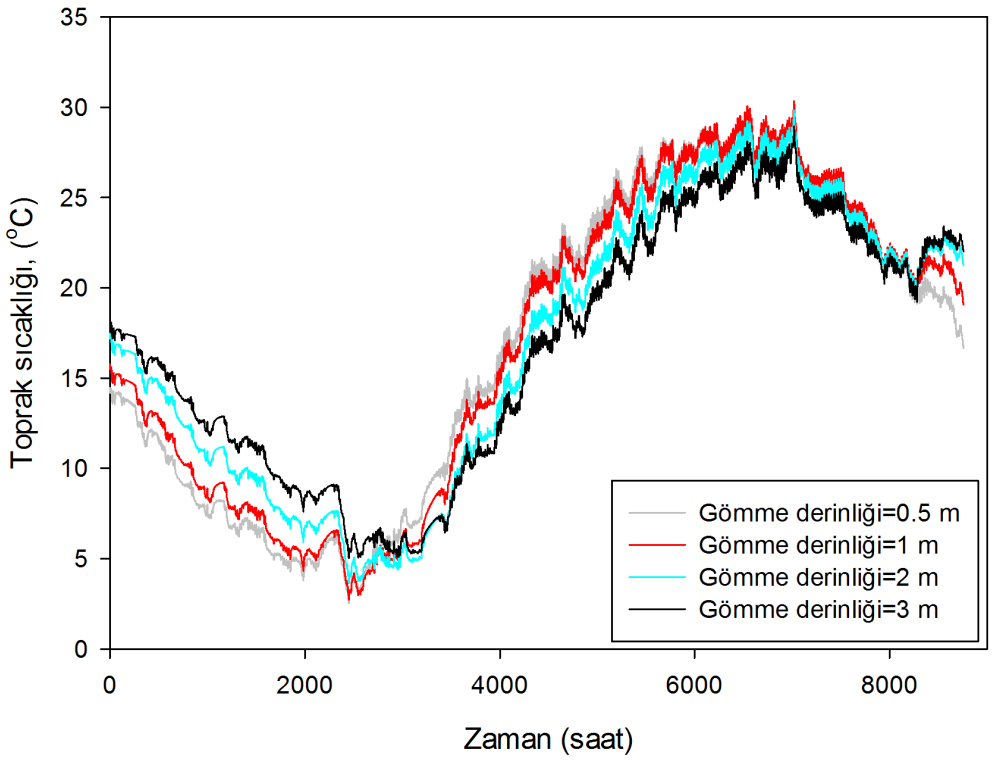


(e)

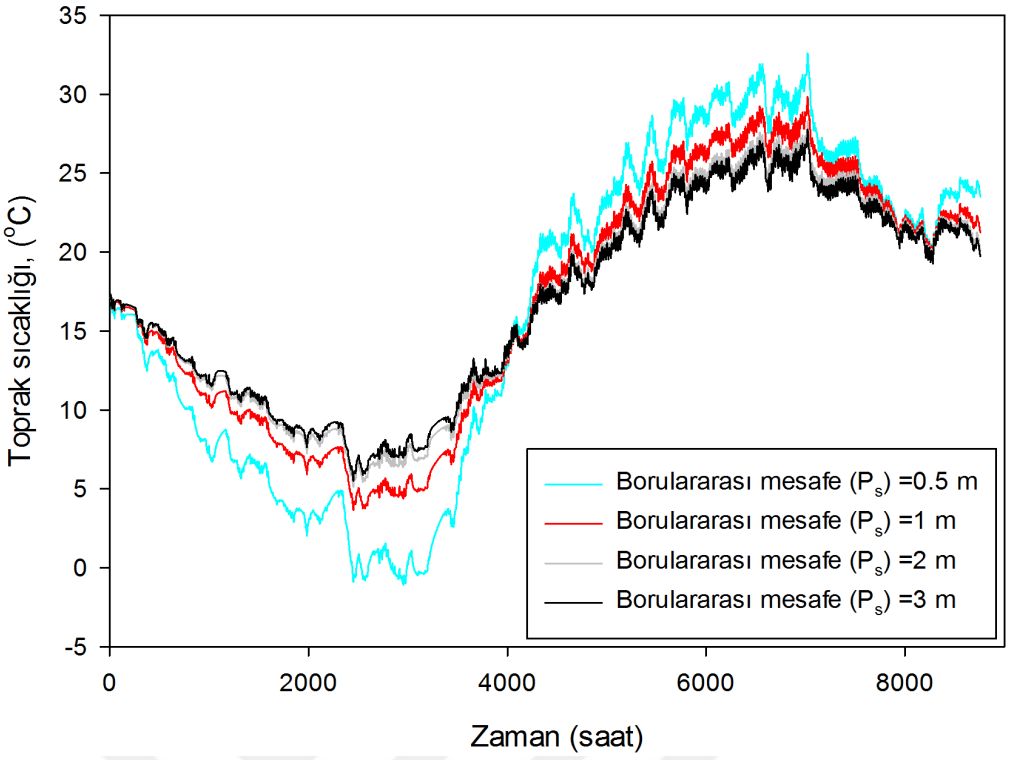
Şekil 4. 35 Toprağın yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı zamanla değişiminin görünümü, Taşınım (a), Buharlaşma (b), Güneş radyasyonu (c), Yayılan uzun dalga (d), Gelen uzun dalga radyasyonu (e)



Şekil 4. 36 Toprak yüzeyinde meydana gelen tüm ısı akılarının ayrı ayrı etkilerinin aylık olarak değişimlerinin görünümü



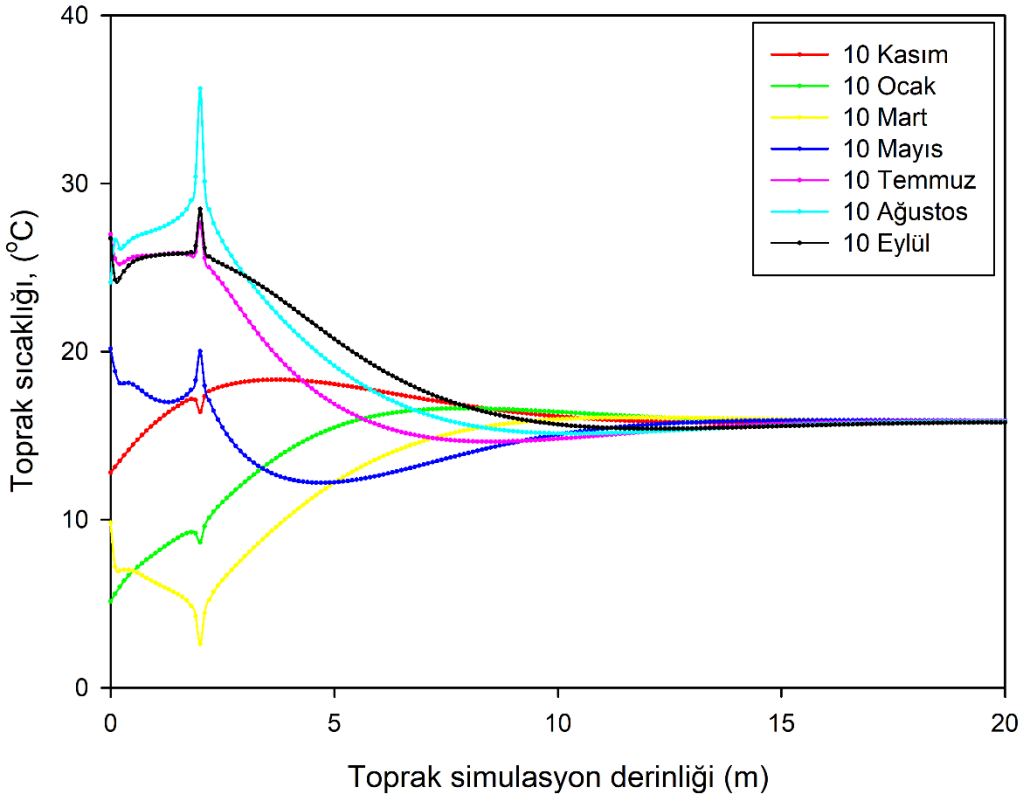
Şekil 4. 37 Ps=1 m'de NPT=20 için farklı gömme derinliğinin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi



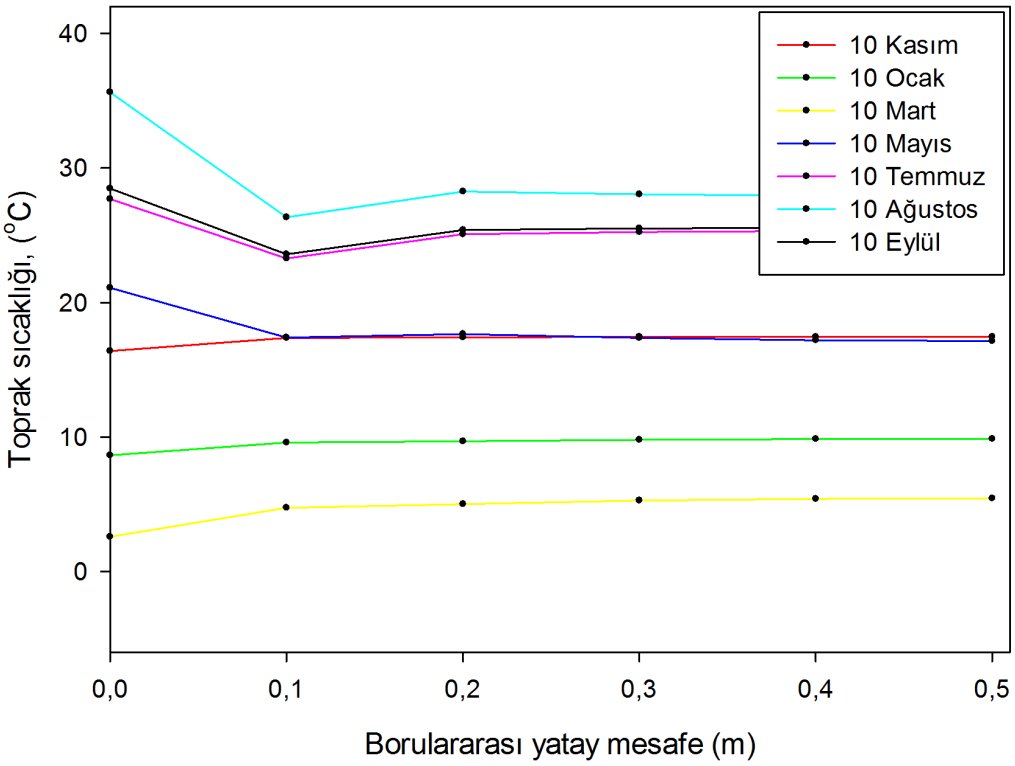
Şekil 4. 38 Y=2 m'de NPT=20 için farklı borulararası mesafelerin zamana bağlı olarak toprak sıcaklığındaki değişimi

Ancak, Şekil 4.37'de görüldüğü üzere, ısıtma sezonunun sonunda gömme derinliği arttıkça toprak sıcaklığı düşmektedir. Aynı şekilde, soğutma sezonunun sonunda gömme derinliği arttıkça toprak sıcaklığı artmaktadır. Bunun sebebi, gömülü boru, toprak yüzeyine daha yakın olduğundan (Y=0.5 m gibi) iklim değişikliklerinden daha çabuk etkilenmesidir. Borulararası mesafe arttığında toprak sıcaklığı daha kararlı bir hale gelmekte ve ısıtma sezonunda en yüksek, soğutma sezonunda ise en düşük sıcaklığa sahip olmaktadır. Özetle, gömme derinliği arttıkça hem ısıtma ve hem de soğutma sezonlarında yüksek COP değerleri elde edilmektedir. Ek olarak, Şekil 4.38 incelendiğinde borulararası mesafenin 2 m ve 3 m olması, toprak sıcaklığı üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmektedir.

Şekil 4.39a'da görüldüğü üzere, toprak sıcaklığının ısıtma ve soğutma sezonu aylarında topraktaki dikey simülasyon derinliği (20 m) boyunca toprak sıcaklığının değişimi verilmiştir. Borular 2 m derinliğe gömülmüş olduğundan dolayı dikey simülasyon derinliğinin 2 m olduğu yerde topraktan ısı çekildiğinde sıcaklık düşerken, toprağa ısı verildiğinde sıcaklık artmaktadır.



(a)

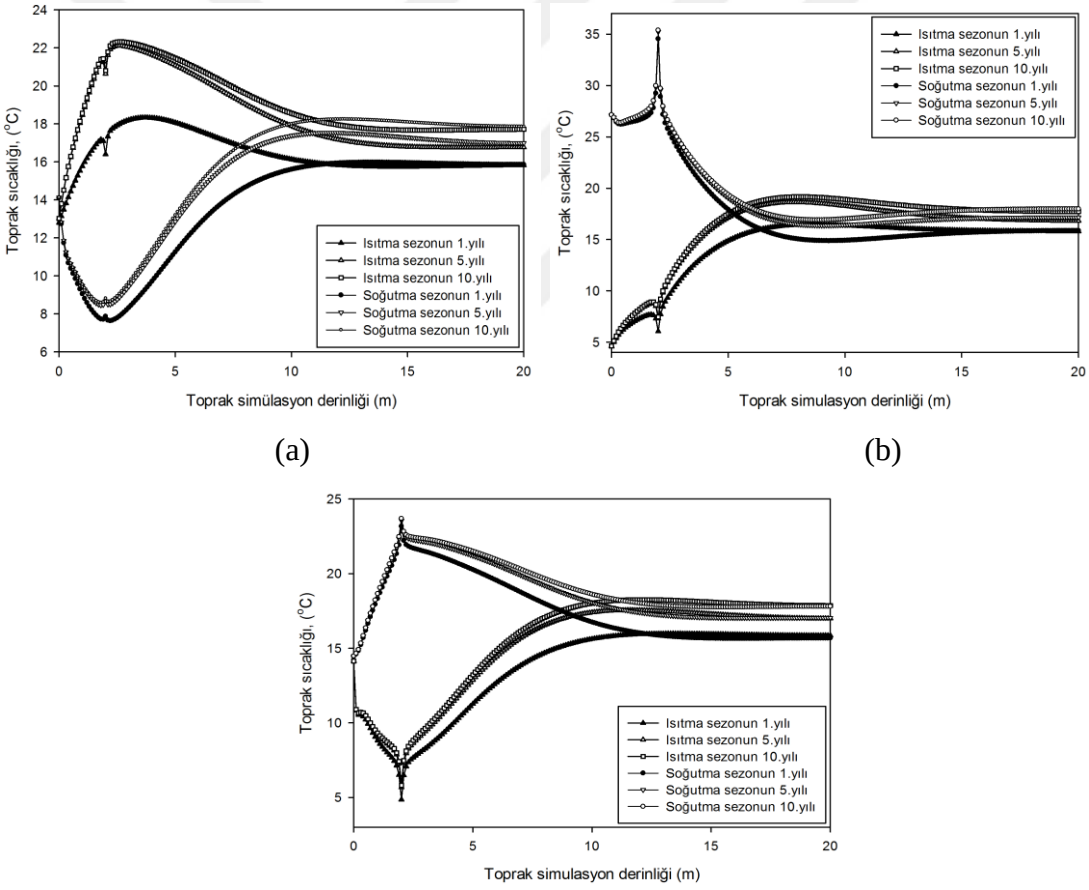


(b)

Şekil 4. 39 Y=2 m ve Ps=1 m'de ve NPT=20 için yılın farklı aylarında toprak sıcaklığının dikeyde (a) ve yatayda (b) değişimleri

Her yıl 10 Kasımda topraktan ısı çekilmeye başlanarak 3 Nisan'a kadar devam etmekte ve 3 Nisan-9 Kasım arasında da toprağa ısı bırakılmaktadır. Şekil 4.39a'da ısıtma sezonu ayları 10 Kasım, 10 Ocak ve 10 Mart olarak verilmişken; 10 Mayıs, 10 Temmuz, 10 Ağustos ve 10 Eylül soğutma sezonu ayları olarak belirlenmiştir. Isıtma sezonunda boru çevresinde en düşük toprak sıcaklıkları Mart ayında olurken, soğutma sezonunda boru etrafında en yüksek toprak sıcaklıkları Ağustos ayında gerçekleşmektedir (Şekil 4.39a).

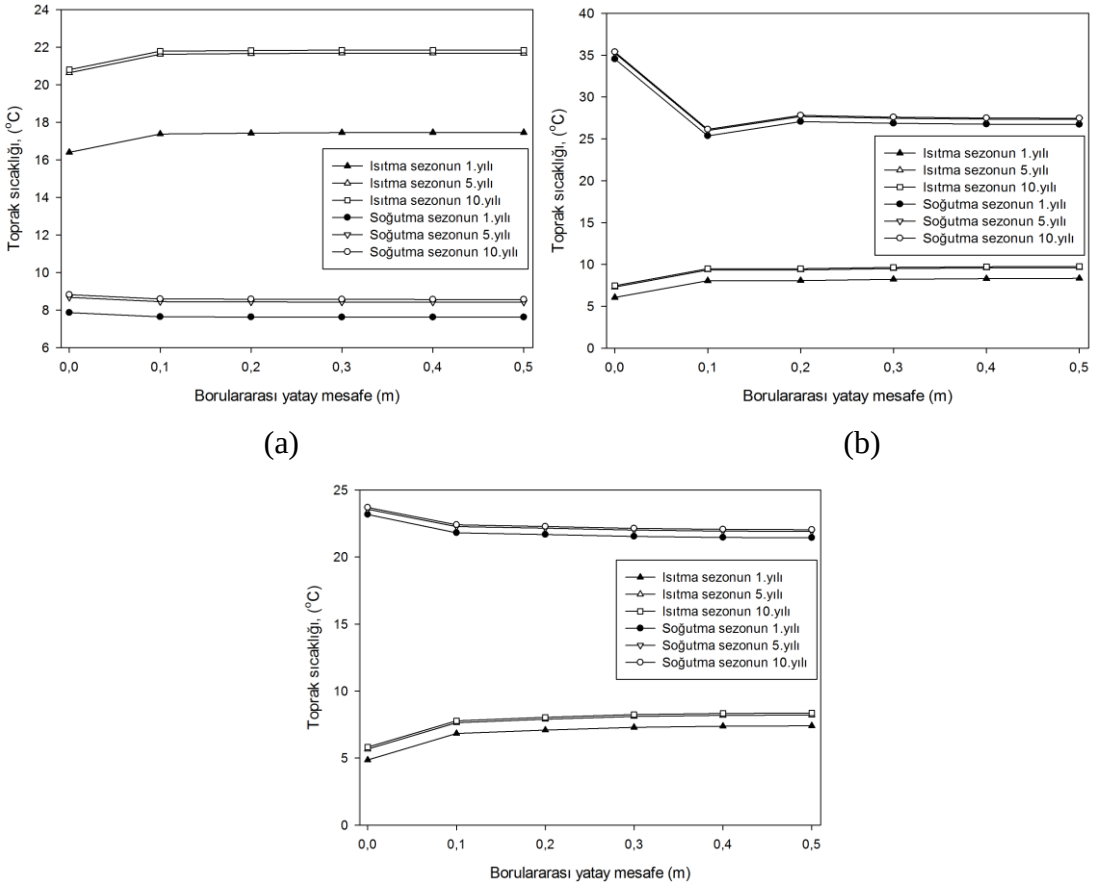
Şekil 4.39b'de görüldüğü üzere, ısıtma ve soğutma sezonu için farklı aylara göre gömülü boru etrafındaki toprak sıcaklığının yataydaki değişimi incelenmiştir. Şekil 4.39b'de, x=0 noktası boru merkezini, x=0.5 noktası ise iki boru arasının ortasını göstermektedir. Isıtma sezonunda topraktan ısı çekildiğinde, x=0 noktasında sıcaklık düşükken, borunun merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık artmakta ve sonra yatay seyretmektedir.



Şekil 4. 40 Y=2 m, Ps=1 m ve NPT=20 için 1, 5 ve 10'uncu yılların başlangıcında (a), ortasında (b), sonunda (c) toprak sıcaklığının toprak simülasyon derinliğine göre değişimleri

Soğutma sezonunda ise toprağa ısı bırakıldığından, x=0 noktasında sıcaklık yüksekken, borunun merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık azalmaktadır. Isıtma sezonunda boru çevresinde en düşük toprak sıcaklıkları Mart ayında olurken, soğutma sezonunda boru etrafında en yüksek toprak sıcaklıkları Ağustos ayında gerçekleşmektedir (Şekil 4.39b).

Isıtma ve soğutma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, toprak simülasyon derinliği boyunca toprağın sıcaklık dağılımının değişimi Şekil 4.40'da verilmiştir. Topraktan ısı çekildiğinden ya da toprağa ısı bırakıldığından dolayı borunun bulunduğu yerde (Y=2 m) toprak sıcaklığı ısıtma sezonda düşmekte, soğutma sezonunda artmaktadır. Ayrıca, birinci yılın ısıtma ve soğutma sezonlarının başında, ortasında ve sonunda, çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı ısıtma sezonunda sırasıyla 16.41 ^{o}C, 14.46 ^{o}C ve 13.69 ^{o}C ve soğutma sezonunda sırasıyla 13.75 ^{o}C, 17.71 ^{o}C ve 17.51 ^{o}C olarak elde edilmiştir.



(a) (b)

(c)

Şekil 4. 41 Y=2 m, Ps=1 m ve NPT=20 için 1, 5 ve 10'uncu yılların başlangıcında (a), ortasında (b), sonunda (c) toprak sıcaklığının borular arası yatay mesafeye göre değişimleri

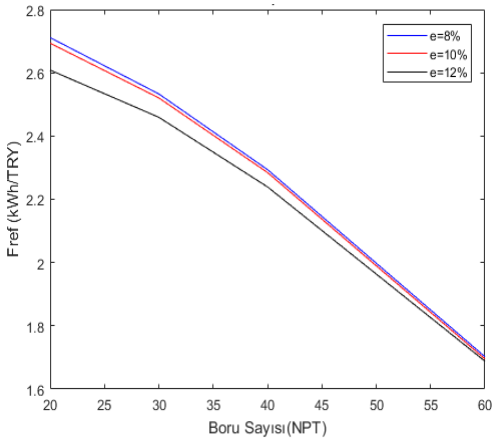
Benzer şekilde, onuncu yılın ısıtma ve soğutma sezonlarının başında, ortasında ve sonunda, çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı ısıtma sezonunda sırasıyla 19.01 ^{o}C, 16.59 ^{o}C ve 15.62 ^{o}C ve soğutma sezonunda sırasıyla 15.68 ^{o}C, 19.45 ^{o}C ve 19.11 ^{o}C olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, TKIP kullanılarak sistem çalıştırıldığında, 10 yıllık ısıtma ve soğutma periyotlarının sonunda, çözüm alanındaki ortalama toprak sıcaklığı NPT=20 (Y=2 ve P_s = 1 m) için yaklaşık 2.7 ^{o}C arttığı bulunmuştur (Şekil 4.40a, 40b ve 40c).

Bunun nedeni, şartlandırılacak mahallin soğutma yükü ısıtma yükünden daha fazla olması ve ısıtma sezonundaki çalışma süresi, soğutma sezonundaki çalışma süresinden daha az olmasından dolayı, on yılın sonunda toprak sıcaklığı artmıştır. Eğer NPT azaltılırsa yani birim boru boyu için topraktan daha fazla ısı çekilir ya da toprağa daha fazla ısı bırakılırsa (NPT=10 gibi), ortalama toprak sıcaklığı daha da artacaktır.

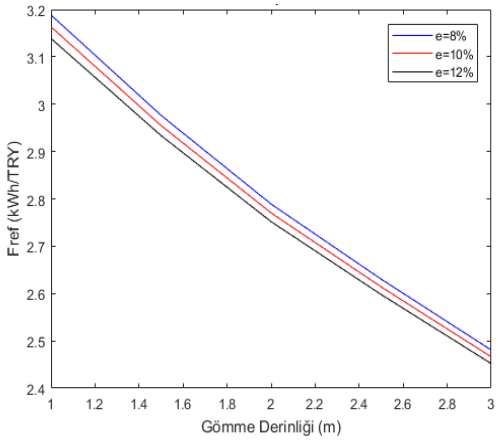
Şekil 4.41, Y = 2 m ve P_s = 1 m'de NPT=20 için birinci, beşinci ve onuncu yılın başında, ortasında ve sonunda yatay toprak sıcaklık dağılımının değişimini göstermektedir. Topraktan ısı çekildiğinde boru etrafındaki toprak sıcaklığı (Y=2 m) düşmekte ve borudan yatay olarak uzaklaştıkça artmakta ve sonra değişmemektedir. Toprağa ısı bırakıldığında boru etrafındaki toprak sıcaklığı yükselmekte ve borudan yatay olarak uzaklaştıkça azalmakta ve sonra değişmemektedir. Şekil 4.41a, 41b ve 41c'de görüldüğü gibi, birinci yılın ısıtma ve soğutma sezonlarının başında, ortasında ve sonunda, boru etrafındaki toprağın sıcaklığı ısıtma sezonunda sırasıyla 16.40 ^{o}C, 6.05 ^{o}C ve 4.85^{o}C ve soğutma sezonunda sırasıyla 7.86 ^{o}C, 34.54 ^{o}C ve 23.17^{o}C olarak bulunmuştur. Ayrıca, onuncu yılın ısıtma ve soğutma sezonunun başında, ortasında ve sonunda, boru çevresindeki toprak sıcaklığı ısıtma sezonunda sırasıyla 20.80 ^{o}C, 7.45 ^{o}C ve 5.81^{o}C ve soğutma sezonunda sırasıyla 8.81 ^{o}C, 35.38 ^{o}C ve 23.69^{o}C bulunmuştur.

Sonuç olarak, TKIP kullanılarak sistem çalıştırıldığında, 10 yıllık ısıtma ve soğutma periyotları sonunda, boru etrafındaki toprak sıcaklığının NPT=20 (Y=2 m ve P_s = 1 m) için yaklaşık 7.3 ^{o}C arttığı elde edilmiştir (Şekil 4.41a, 41b ve 41c). Bu artışın topraktaki ortalama sıcaklığa göre fazla olmasının nedeni, gömülen (Y=2 m) boru etrafında ısı transferi meydana geldiğinden o bölgedeki toprak sıcaklığını çok değiştirmektedir. Ancak ortalama toprak sıcaklığı hesaplanırken, çözüm alanı 20 m toprak derinliği boyunca

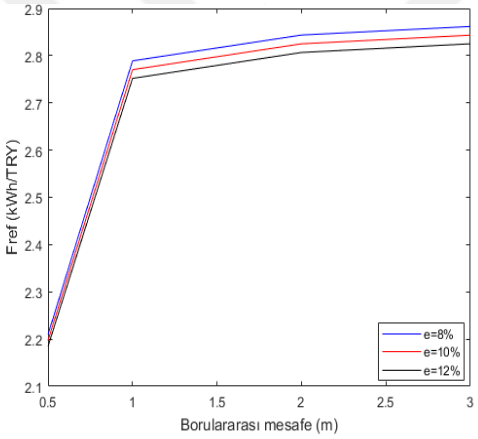
sıcaklık değişimi alındığından dolayı boru etrafındaki ısıl hareketliliğin toprak derinliklerine ulaşması oldukça zor olmaktadır.



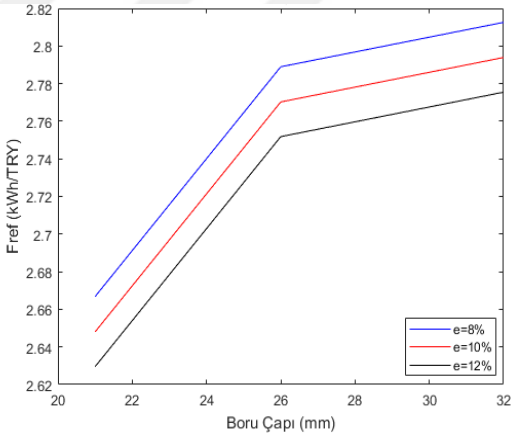
(a)



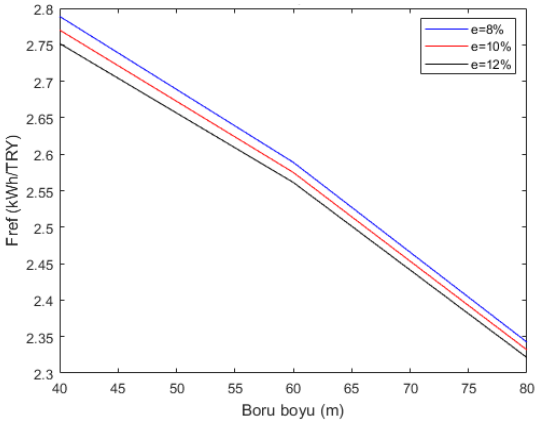
(b)



(c)

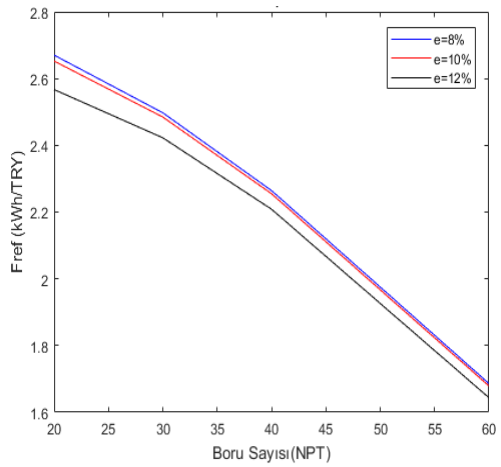


(d)

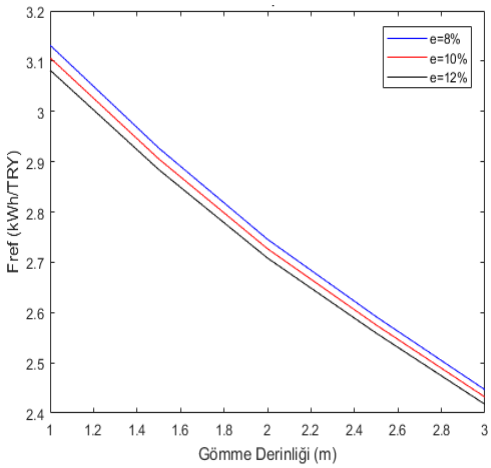


(e)

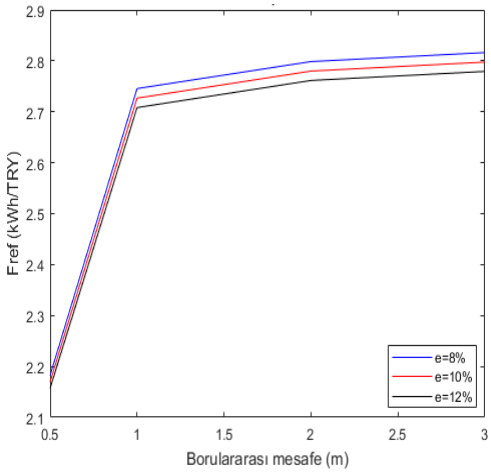
Şekil 4. 42 30 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi



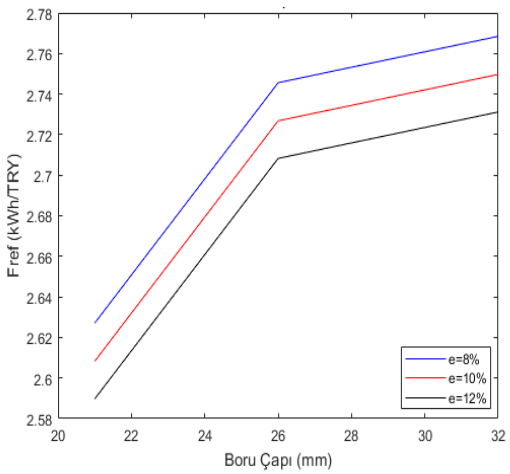
(a)



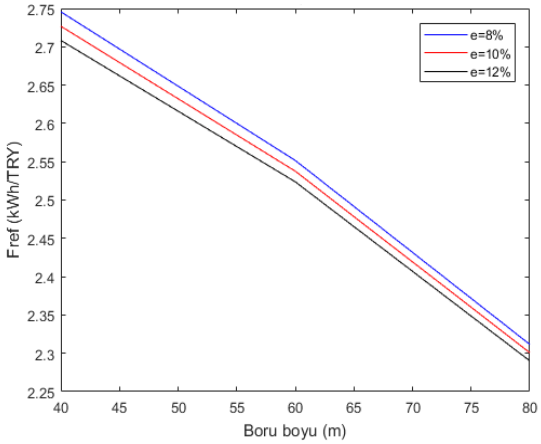
(b)



(c)

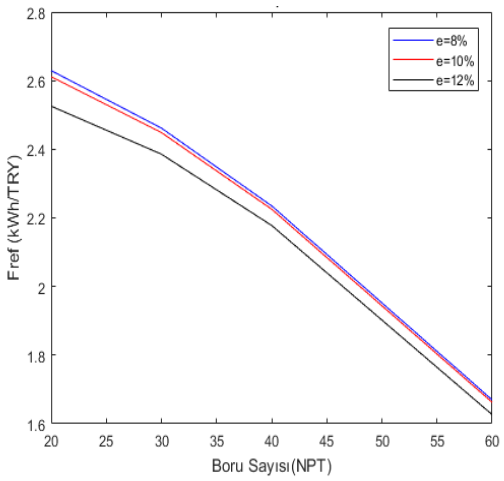


(d)

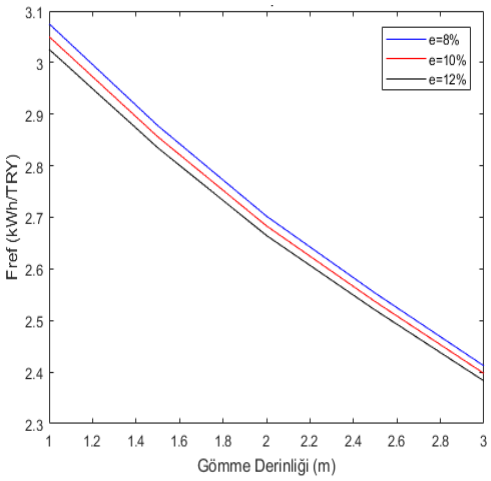


(e)

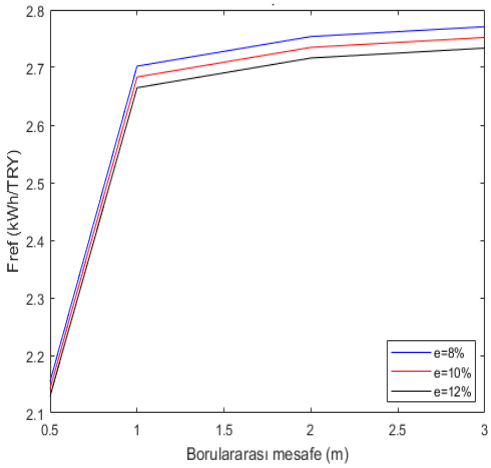
Şekil 4. 43 40 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi



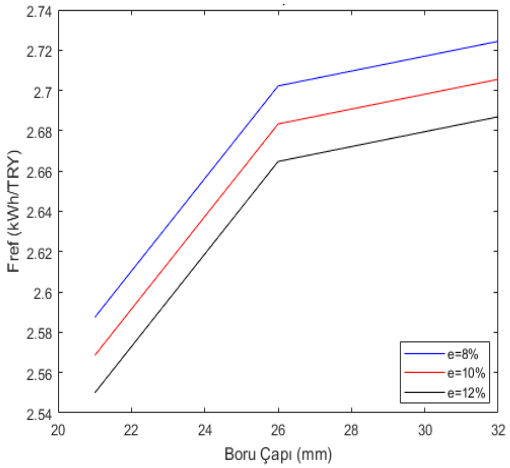
(a)



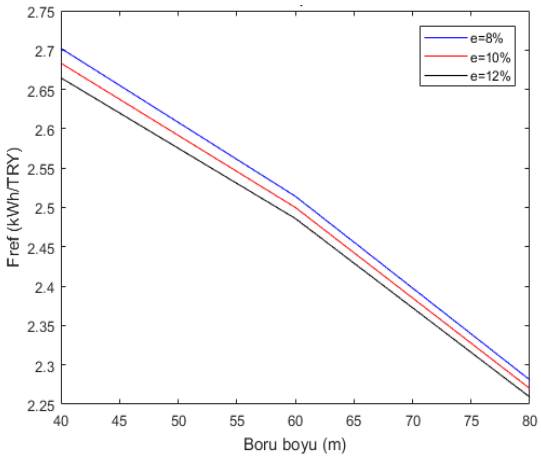
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4. 44 50 °C yoğuşma sıcaklığında (a) Boru sayısına göre, (b) Gömme derinliğine göre, (c) Borular arası mesafeye göre, (d) Boru iç çapına göre, (e) Boru uzunluğuna göre elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi

Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıkları MATLAB'ta yazılan yeni bir koda girdi parametresi olarak verilmiştir. Geliştirilen bu kod yardımıyla, TKIP sistemin saatlik enerji analizi yapılarak anlık COP değerleri ve sistemin enerji tüketimi hesaplandı. Simülasyon verilerini kullanarak TKIP sistemin yıllık işletme maliyeti 10 yıllık periyot için elde edildi. İlk yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınarak, referans fonksiyon bir optimizasyon parametresi olarak tanımlandı. Elektrik fiyatlarının artış oranı, paralel boru sayısı, gömme derinliği, borular arası mesafe, boru çapı ve uzunluğunun referans fonksiyon üzerindeki etkisi incelendi.

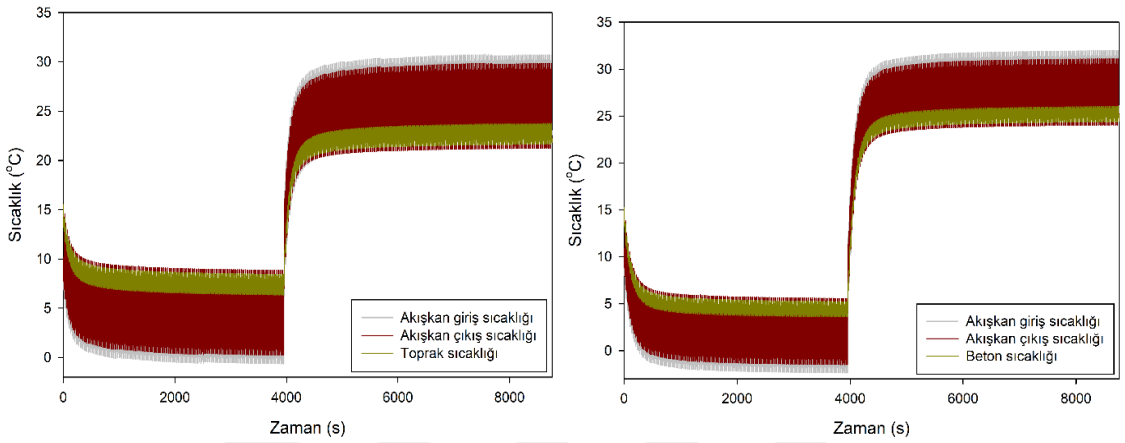
Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'de elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişiminin, farklı tasarım parametreleri olan NPT, gömme derinliği, boru aralığı, boru çapı, boru uzunluğu ve ısıtma sezonunda farklı yoğuşma sıcaklıklarının etkileri incelenmiştir (Farklı uygulamalar için örneğin; duvar panel ısıtması, zemin ısıtması ve radyatör). NPT, gömme derinliği ve boru uzunluğu artarken referans fonksiyon düşmekte, borular arası mesafe ve boru çapının artmasıyla referans fonksiyon artmaktadır.

Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'de, NPT ve boru uzunluğu arttığında, topraktan çekilen ya da toprağa bırakılan ısı miktarındaki artış; kazı, boru ve işçilik maliyetinden azsa, referans fonksiyon düşmektedir. Elektrik fiyatlarındaki artış oranının referans fonksiyon üzerindeki değişimi, paralel boru sayısı az olduğunda fazla, boru sayısı fazla olduğunda değişim az olmaktadır. Şekil 4.42b, 4.43b ve 4.44b'de, gömme derinliği arttığında, topraktan çekilen ya da toprağa bırakılan ısı miktarındaki artış, kazı ve işçilik maliyetinden azsa, referans fonksiyon düşmektedir. Borular arası mesafe içinse, 1 m'ye kadar keskin bir artış olurken, 1 m'den yüksek değerler için ise referans fonksiyondaki artış oldukça azdır. Aynı şekilde boru çapı için de benzer durum görülmektedir.

Borunun iç çapı 26 mm den küçük olduğunda referans fonksiyon ani şekilde düşer. Ayrıca boru çapının elektrik fiyatlarındaki artış oranındaki değişimine göre daha hassas olduğu görülmüştür. Yoğuşma sıcaklığının artmasıyla referans fonksiyon azalır. Bu yüzden TKIP için duvar panel ısıtmanın daha uygun olduğu söylenmektedir. Ayrıca boru uzunluğu arttığında referans fonksiyon düşer. Çünkü işçilik ve kazı maliyetindeki artış topraktan çekilen veya toprağa transfer edilen ısı miktarındaki artıştan daha büyüktür.

4.4.3 Bina Temelinin Altındaki Toprağa ve Bina Temeline Yerleştirilen Isı Değiştiricisine ait Simülasyon Sonuçları

Toprak ısı değiştiricilerinin boyutlandırılması sadece teknik parametrelere (gömme derinliği, borular arası mesafe ve boru sayısı) değil aynı zamanda da ekonomik parametrelere (ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri, enflasyon oranı, elektrik fiyatları ve elektrik fiyatlarındaki artış oranı) bağlıdır.

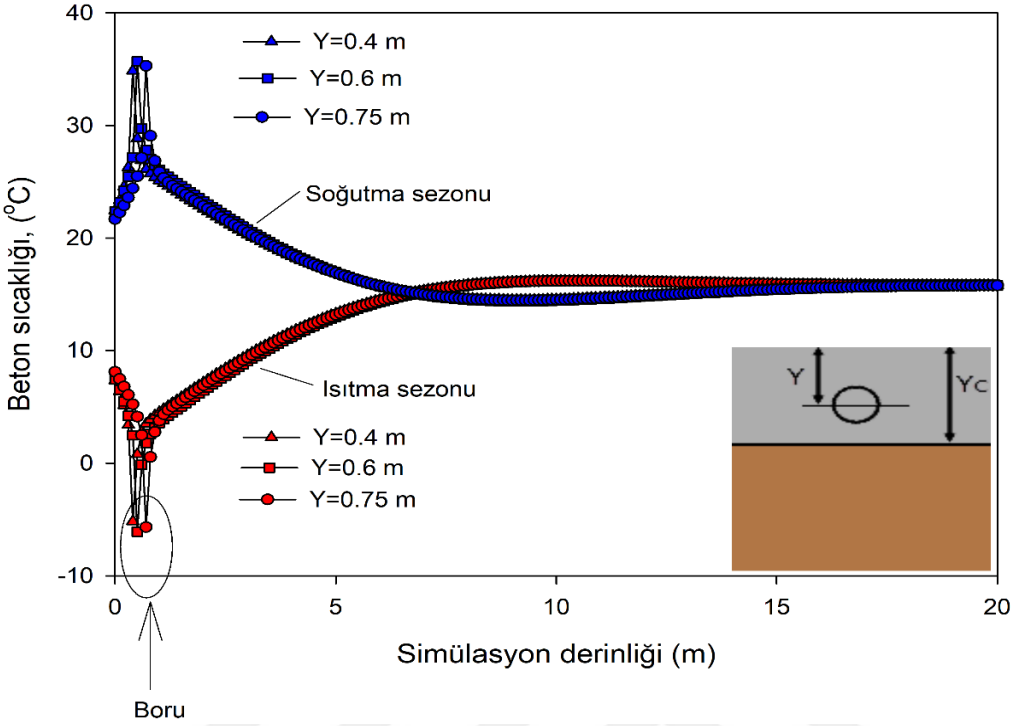


Şekil 4. 45 Bina temelinin altındaki toprağa (a) ve Bina temeline (b) gömülü boruların zamana göre akışkan giriş, çıkış, toprak ve beton sıcaklıklarının değişimi

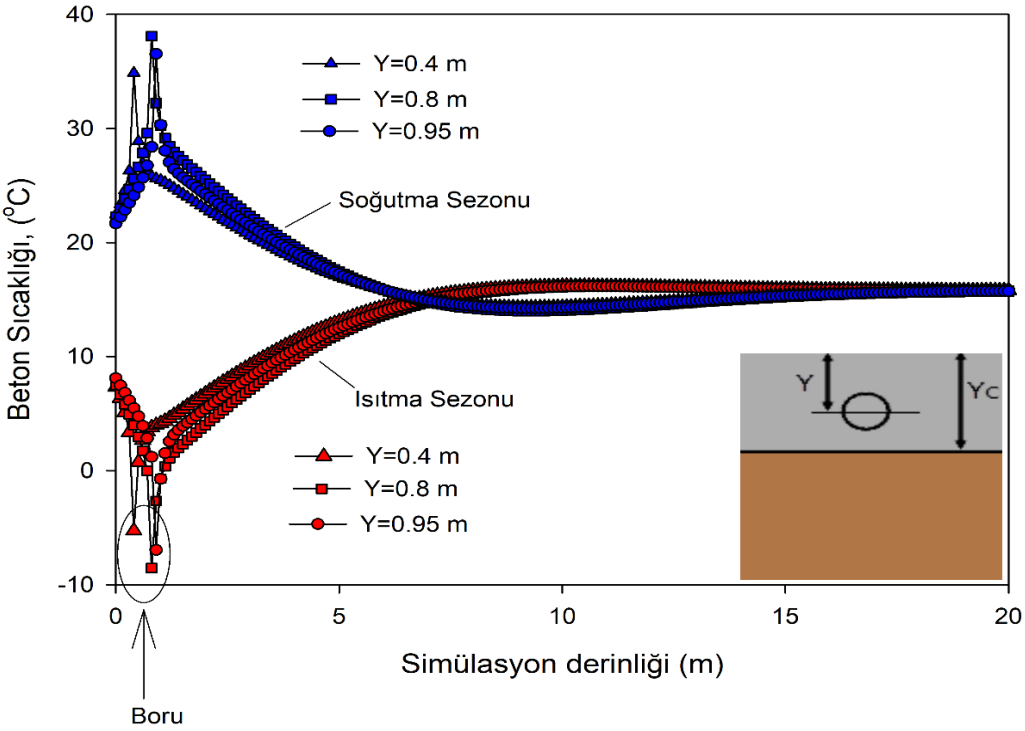
Bu çalışmada, 17 simülasyon çalışması yapılarak 10 yıllık periyotta bina temeline ve bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilen borular etrafındaki saatlik beton ve toprak sıcaklıkları, ve boru içerisinde akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir. Alışveriş merkezine sağlanan saatlik ısıtma ve soğutma yüklerine karşılık gelen akışkan giriş sıcaklığı 10 yıllık periyotta farklı boru sayıları ve kurulum yerlerine göre simüle edilmiştir. Şekil 4.45'de, akışkan giriş ve çıkış ve boru etrafındaki toprak ve beton sıcaklıkları 2 farklı durum için 1 yıllık periyotta verilmiştir. Sıcaklık profilleri her iki durum içinde ısıtma ve soğutma sezonunda aynı değişimi göstermiştir. Toprak ve beton sıcaklıklarının genliği, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının genliğinden daha az olduğu görülmektedir.

Şekil 4.46'da, ısıtma ve soğutma sezonlarının ortasında iki farklı temel yüksekliği için bina temellerinde boru konumlarının etkilerini göstermektedir. Yc=0.8 m için beton sıcaklığı,

2 m'den daha derinlere gömülmüş boruların konumundan hem ısıtma hem de soğutma sezonunda etkilenmediği görülmüştür (Şekil 4.46a).

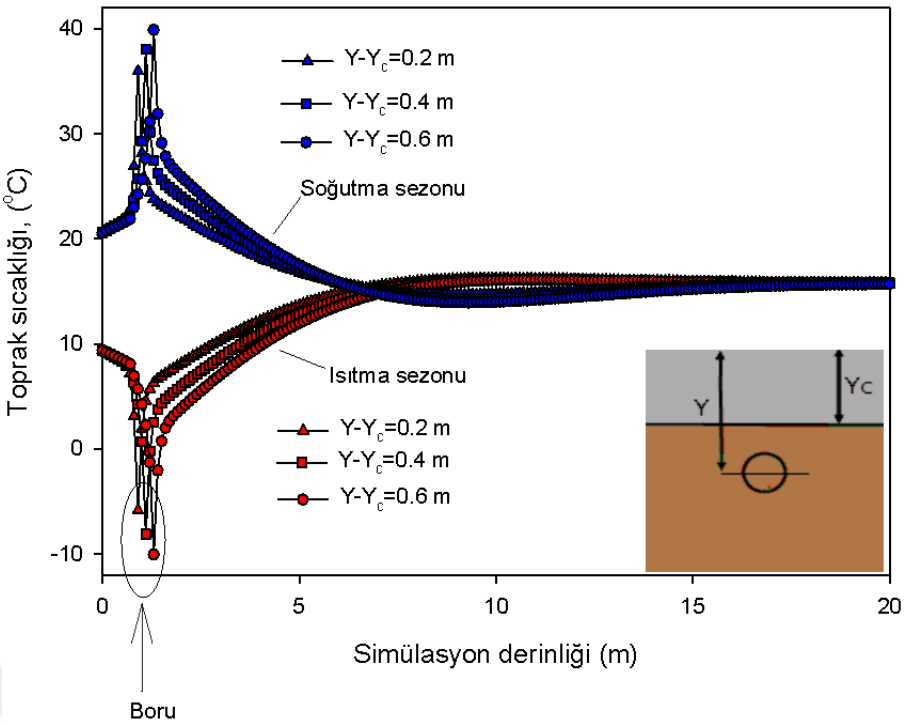


(a)

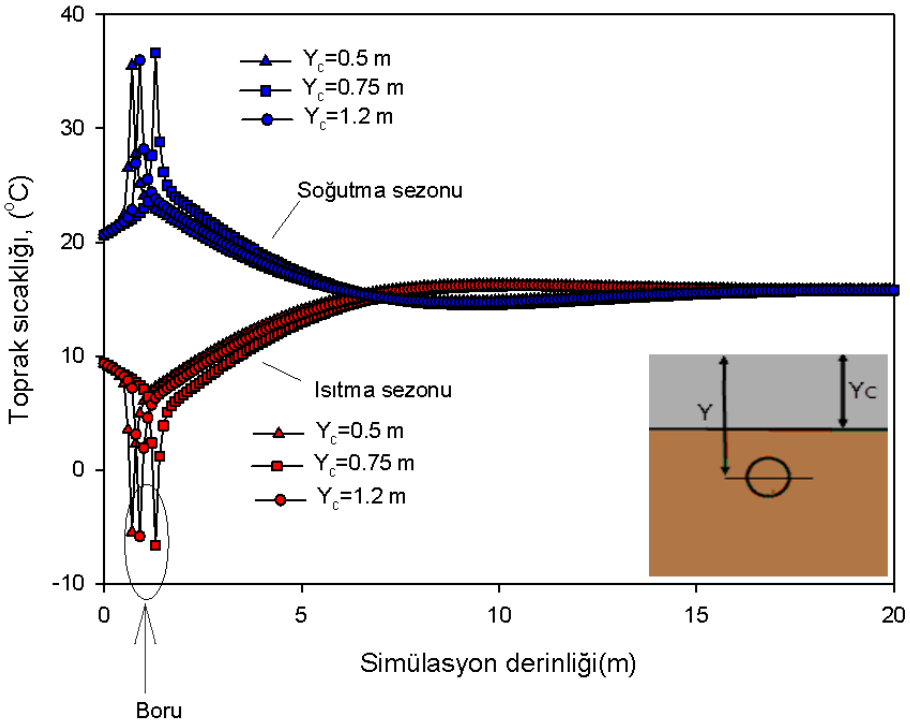


(b)

Şekil 4. 46 Yc = 0.80 m (a), Yc = 1 m (b) için ısıtma ve soğutma sezonunun ortasında binanın temelinde farklı derinliklere yerleştirilen borular için beton sıcaklığının değişimi



Şekil 4. 47 Yc = 0.75 m için ısıtma ve soğutma sezonunun ortasında, bina temelinin altındaki toprağın farklı derinliklerine yerleştirilen borular için toprak sıcaklığının değişimi



Şekil 4. 48 Y-Yc = 0.2 m için bina temelinin farklı derinliklerine göre toprak sıcaklığının değişimi

Ayrıca, boru çevresinde sıcaklıklar birbirine yakındır. 1 m temel yüksekliği için, sıcaklık profilleri farklı gömme derinlikleri için birbirlerinden sapmaktadır (Şekil 4.46b). Gömme derinliği 0,4 m olan boru çevresindeki beton sıcaklıkları, ısıtma sezonunda en yüksek ve soğutma sezonunda en düşük sıcaklıktır. Ek olarak, Y = 0.8 m için de borunun çevresindeki beton sıcaklıkları, ısıtma sezonunda en düşük ve soğutma sezonunda en yüksek sıcaklıktır.

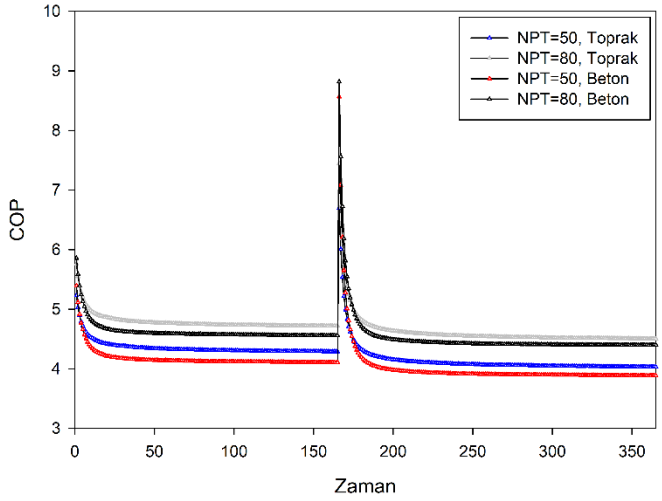
Bina temelinin altında toprakta farklı derinliklere yerleştirilen borular için toprak sıcaklığının değişimi Şekil 4.47'de verilmiştir. Bina temeline olan uzaklık azaldıkça ısıtma sezonunda toprak sıcaklığı yüksek, soğutma sezonunda ise düşük olmaktadır.

Şekil 4.48'de, farklı bina temel yükseklikleri için toprak sıcaklığının değişimini göstermektedir. Temel yüksekliği 0,75 m ve boruların bina temelinin altından 0,2 m derinlikte toprağa yerleştirildiğinde ısıtma sezonunda en yüksek sıcaklıklar ve soğutma sezonunda en düşük sıcaklıklar elde edilir.

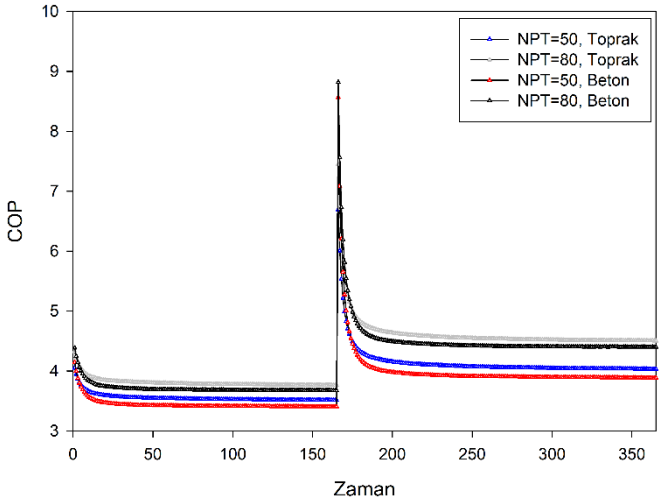
Isıtma sezonunda üç farklı yoğuşma sıcaklığı ve soğutma sezonunda bir buharlaşma sıcaklığı dikkate alınarak boruların kurulum yerlerine ve farklı boru sayılarına göre COP'nin değişimi Şekil 4.49'da verilmiştir. 3 farklı yoğuşma sıcaklığında da boruların bina temelinin altındaki toprağa yerleştirildiğinde COP değerleri, bina temeline yerleştirilmesi durumuna göre daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, COP değerlerinin, her iki sezon boyunca da topraktan ve betondan ısı çekilmesi veya toprağa ve betona ısı aktarılması sonucu oluşan sıcaklık farklılıklarından dolayı, ısıtma ve soğutma sezonlarının başında COP değerleri en yüksek olduğu görülmektedir.

Ekonomik parametreler dikkate alınırsa, optimizasyon parametresi yukarıda tanımlanan referans fonksiyon olarak alınır. Şekil 4.50, 4.51 ve 4.52'de toprak ve beton için NPT'nin, gömme derinliğinin, temel yüksekliğinin, toprak ve bina temelleri içindeki boru konumunun etkileri, yakıt fiyatlarındaki artış oranı ile birlikte sırasıyla üç farklı yoğuşma sıcaklığı için verilmiştir.

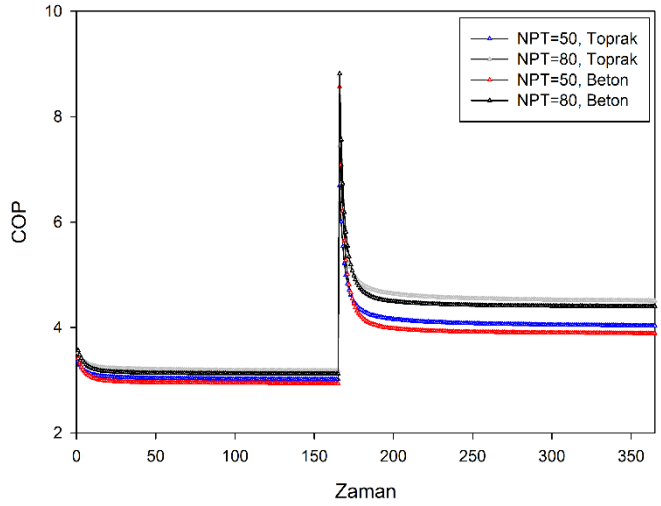
a-)



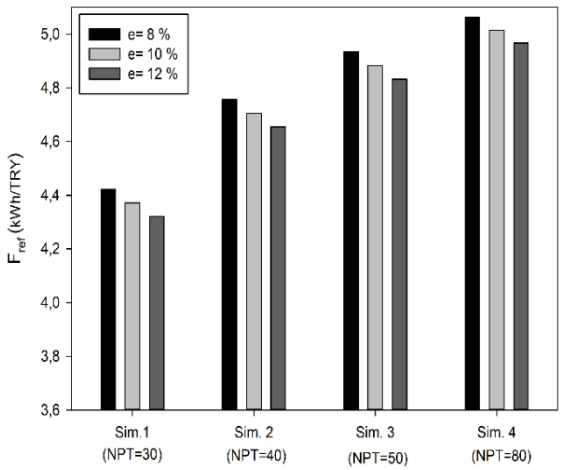
b-)



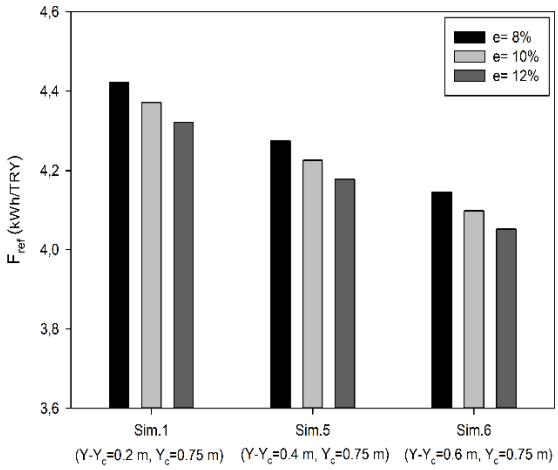
c-)



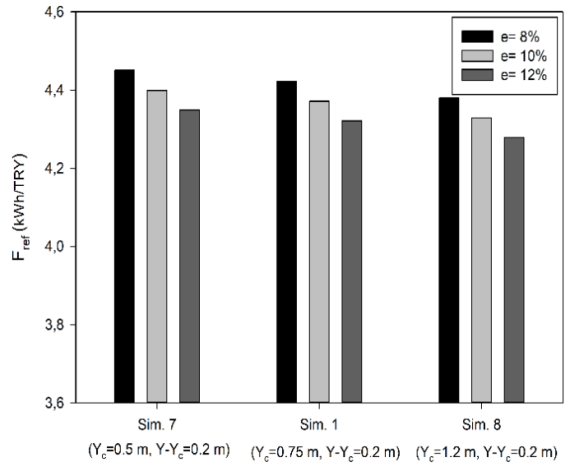
Şekil 4. 49 Boru kurulum yerleri ve paralel boru sayılarına (NPT) göre COP'nin 30 °C (a), 40 °C (b) ve 50 °C (c) yoğuşma sıcaklığına göre değişimi



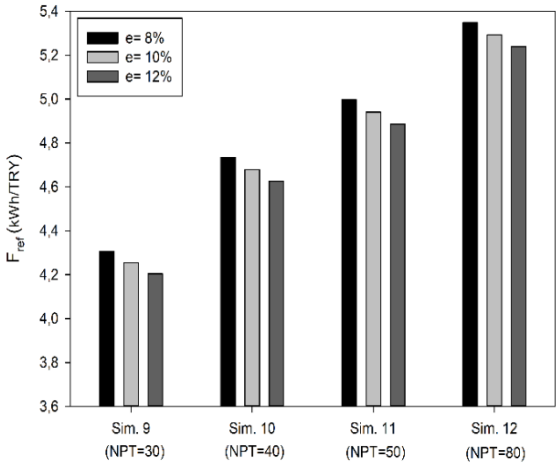
a-) Paralel boru sayısı, toprak



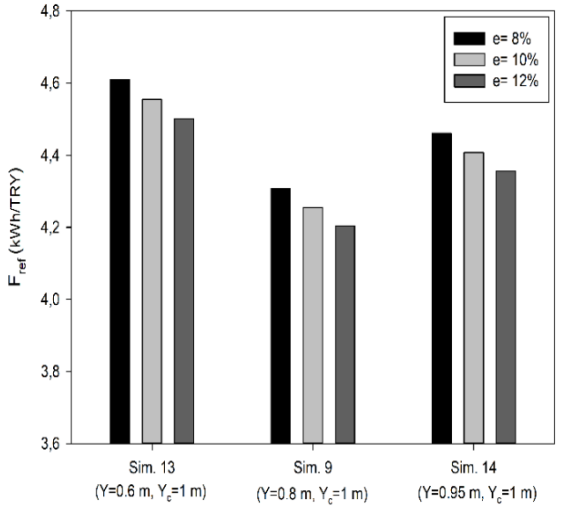
b-) Gömme derinliği, toprak



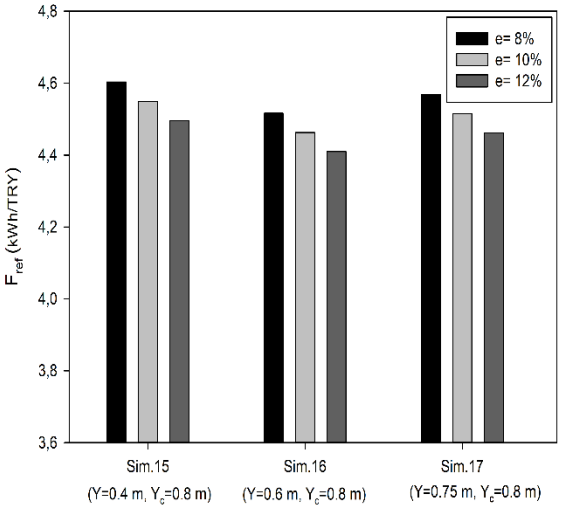
c-) Bina temel yüksekliği, toprak



d-) Paralel boru sayısı, beton

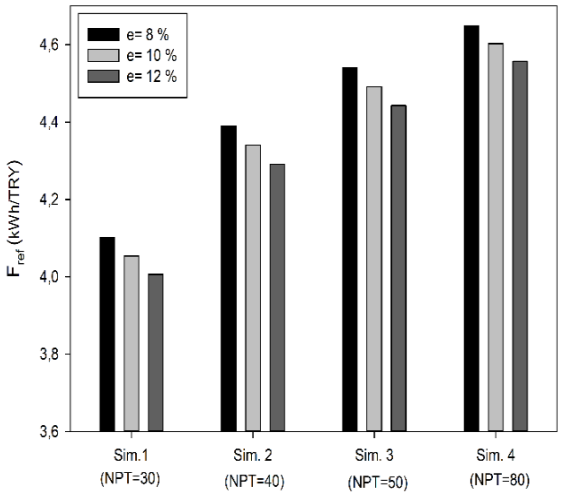


e-) Gömme derinliği, beton

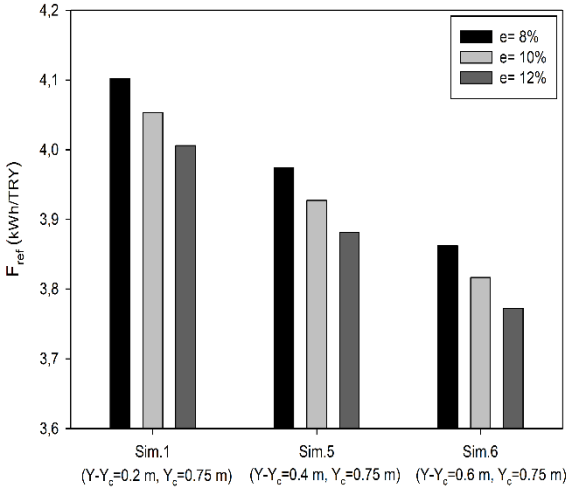


f-) Gömme derinliği, beton

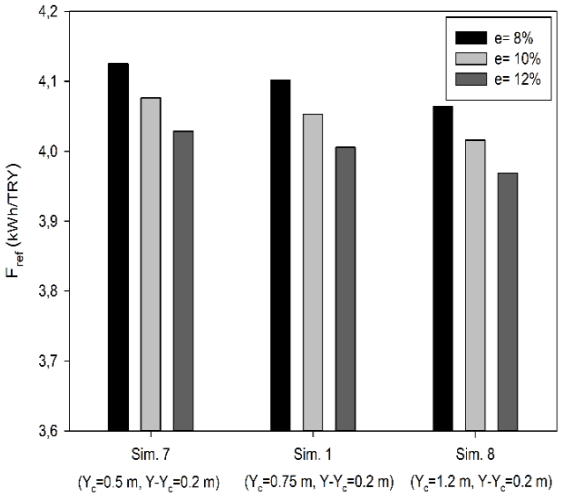
Şekil 4. 50 30 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları



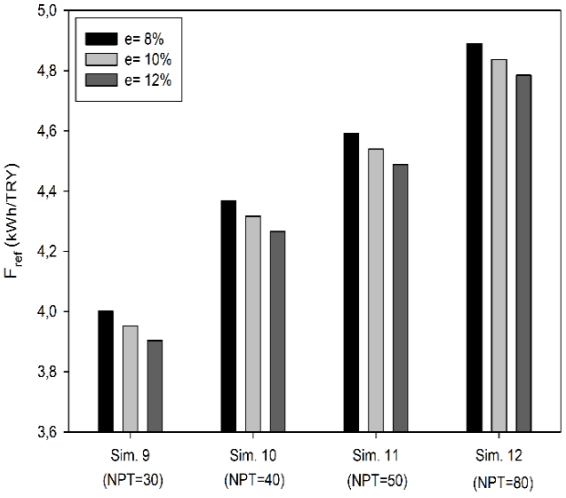
a-) Paralel boru sayısı, toprak



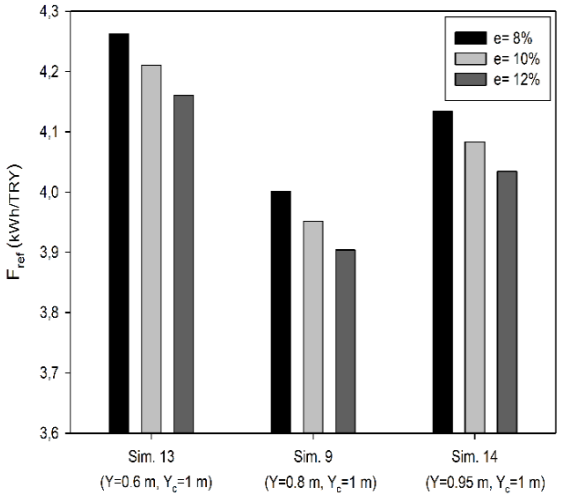
b-) Gömme derinliği, toprak



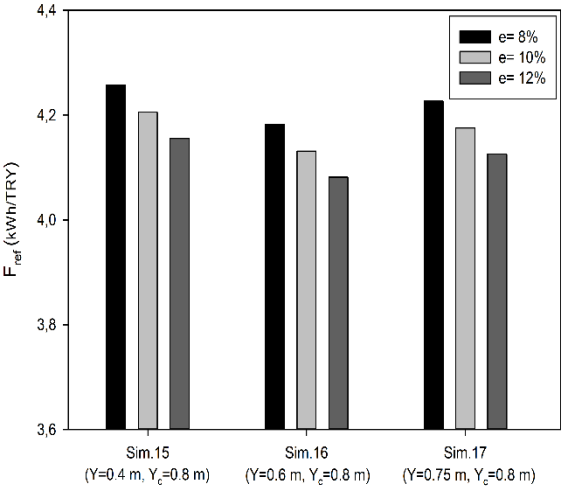
c-) Bina temel yüksekliği, toprak



d-) Paralel boru sayısı, beton

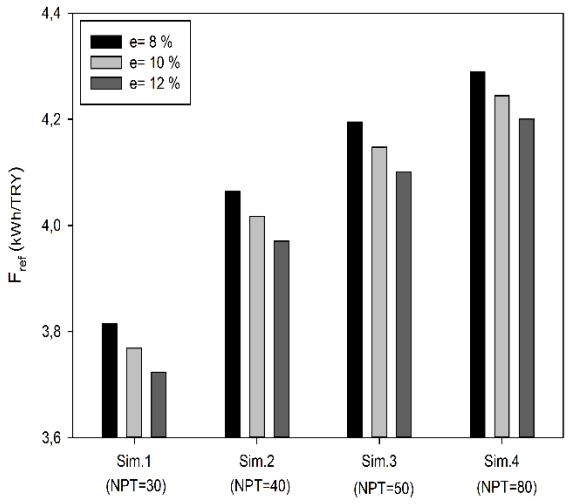


e-) Gömme derinliği, beton

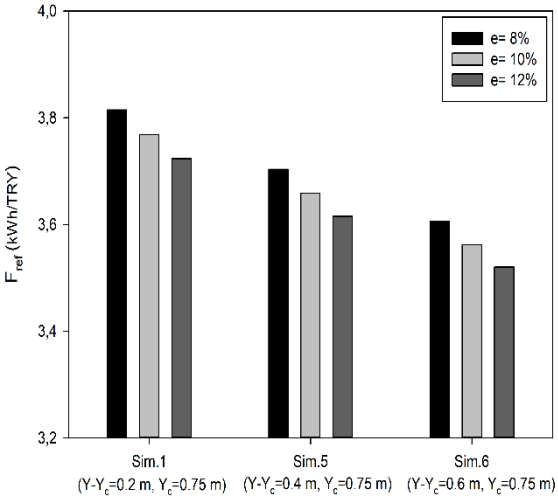


f-) Gömme derinliği, beton

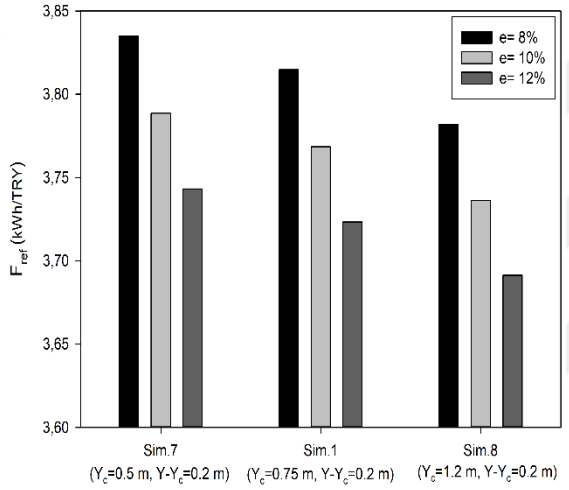
Şekil 4. 51 40 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları



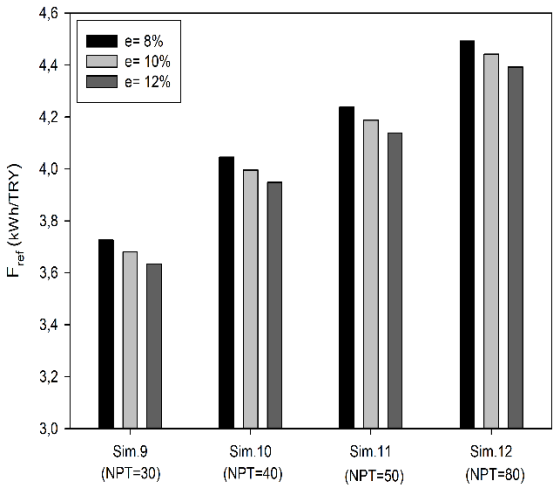
a-) Paralel boru sayısı, toprak



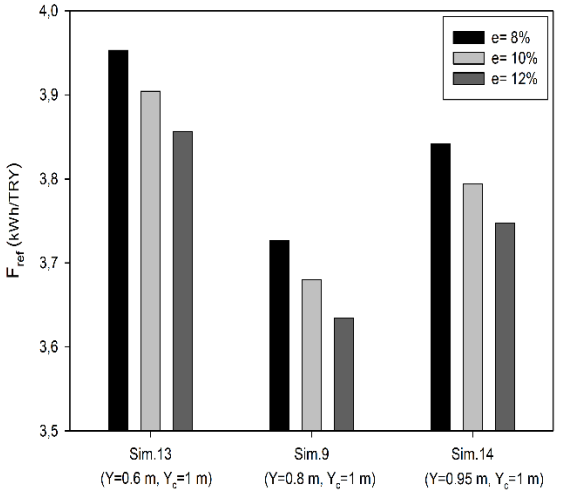
b-) Gömme derinliği, toprak



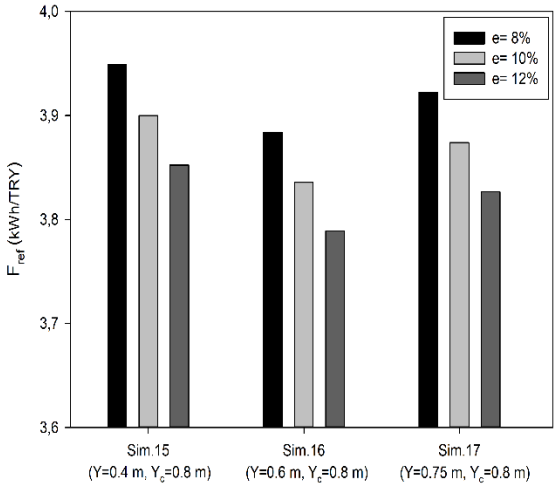
c-) Bina temel yüksekliği, toprak



d-) Paralel boru sayısı, beton

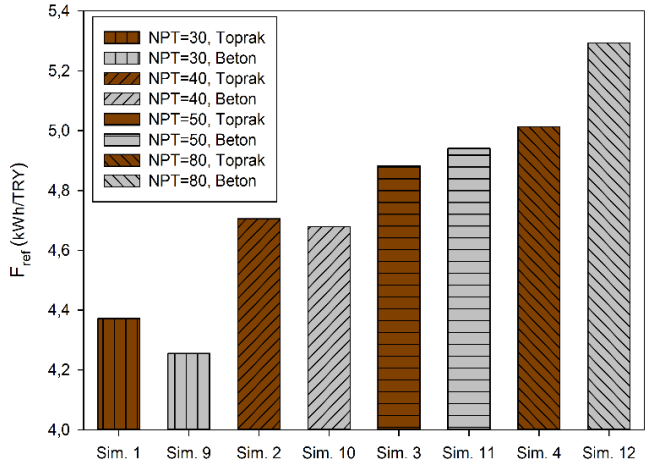


e-) Gömme derinliği, beton

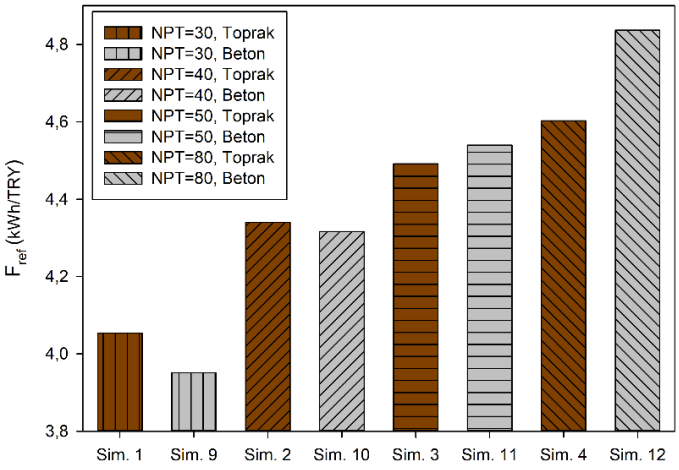


f-) Gömme derinliği, beton

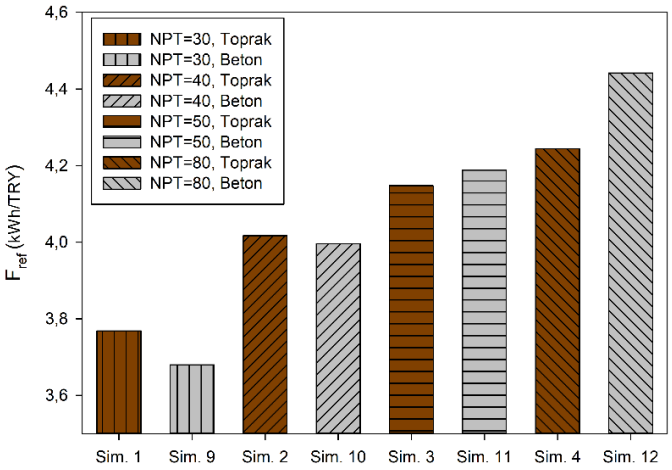
Şekil 4. 52 50 ^{o}C yoğuşma sıcaklığında tüm simülasyonlar için hesap sonuçları



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 53 Boru kurulum yerleri ve paralel boru sayılarına (NPT) göre F_{ref}'ın 30 °C (a), 40 °C (b) ve 50 °C (c) yoğuşma sıcaklığına göre değişimi

Yakıt fiyatlarındaki artış oranı arttıkça referans fonksiyon azalmaktadır. Ayrıca, NPT arttıkça hem beton hem de toprak için referans fonksiyon artmaktadır. Bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilen borular daha derinlere gömüldüğünde, kazı maliyetlerindeki artıştan dolayı referans fonksiyon azalmaktadır. Tüm yoğuşma sıcaklıklarında, bina temelinin yüksekliğinin referans fonksiyon üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.50c, 4.51c ve 4.52c). Ayrıca, bina temel yüksekliğinin arttırılması, referans fonksiyonunu azaltmaktadır. Borular beton içerisine yerleştirildiğinde, referans fonksiyonu gömme derinliğiyle önce azalırken ve daha sonra gömme derinliğiyle ile artmaktadır (Şekil 4.50e ve Şekil 4.50f).

Şekil 4.53'de, referans fonksiyonun en yüksek değerlerinin 30 ^{o}C, 40 ^{o}C ve 50 ^{o}C yoğuşma sıcaklıkları ve 5 ^{o}C buharlaşma sıcaklığı ile Sim. 12'de elde edildiği görülmektedir. Yüksek NPT değerleri için, boruların bina temeline yerleştirilmesi (beton), referans fonksiyon için daha iyi sonuçlar verirken, düşük NPT değerleri için bunun tersi meydana gelmektedir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deney Tesisatının Kurulması Öncesindeki Çalışmalar

Deneysel çalışmalar kapsamında, yatay kaynak ısı değiştiricisi, YTÜ Davutpaşa Kampüsü'nde yeni inşa edilen Merkez Laboratuvarı'nın temel çalışmaları sırasında kaldırılan hafriyatın ardından temelin uygulanacağı bölgeye yerleştirilmiştir. Kaynak Isı değiştirici boruları temel altı toprağına ve temel betonuna gömülerek mahallin ısıtılması ve soğutulması planlanmıştır.

Bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline gömülen kaynak ısı değiştiricileri için yatayda ve dikeydeki toprak ve beton sıcaklıklarını ölçmek üzere deney tesisatında ısıl çiftlerden yararlanılmıştır. Isıl çiftlerin kalibrasyonu referans termometre ve sabit sıcaklık banyosu kullanılarak yapılmıştır. SANTEZ Projesi kapsamında temin edilen ısıl çiftlerin, kalibre edilmeden önce deney tesisatımızda düşünülen farklı konfigürasyonlar için 6 m ve 7 m uzunluklarda olmak üzere hazırlanmıştır.

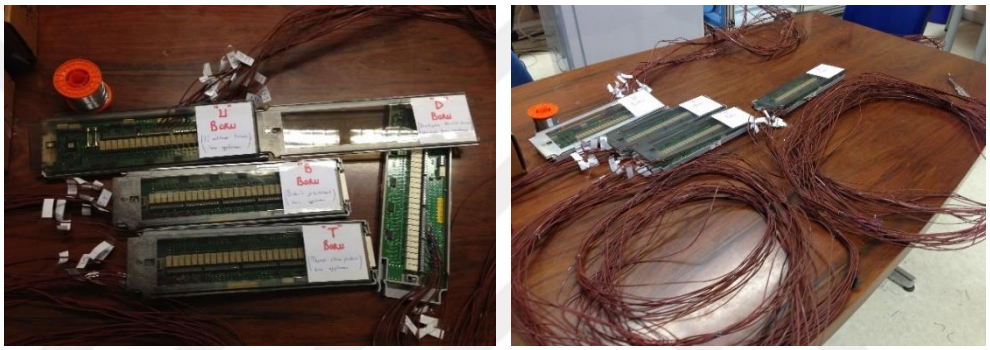


(a) (b)

Şekil 5. 1 Isıl çiftlerin hazırlanması

Şekil 5.1a'da görüldüğü üzere hazırlanan ısıl çiftlerin uçlarının kaynatılması için Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Laboratuvarında bulunan Isıl Çift Kaynak Makinesi

kullanılarak uçları kaynatılmıştır (Şekil 5.1b). Uçları hazırlanan ısıl çiftler, proje kapsamında satın alınan veri toplama ünitesine bağlanarak kalibrasyon için hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b). Üniversite laboratuvarı bünyesinde bulunan ve referans alınabilecek derecede ölçüm yapabilen hassas bir termometre ile tüm ısıl çiftlerin eşit şartlarda ölçüm almaları sağlanmıştır. Kalibrasyon için gerekli sabit şartların sağlanabilmesi amacıyla üniversite laboratuvarında bulunan su banyosu kullanılmıştır (Şekil 5.3a ve Şekil 5.3b). Su banyosuna daldırılan ısıl çiftlerin diğer uçları kanal toplayıcısına bağlanmış ve kanal toplayıcıları da veri toplama ünitesinin içine yerleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında bir paket programı (Benchlink) kullanılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4).



(a) (b)

Şekil 5. 2 Isıl çiftlerin veri toplama ünitesine bağlantısının yapılması

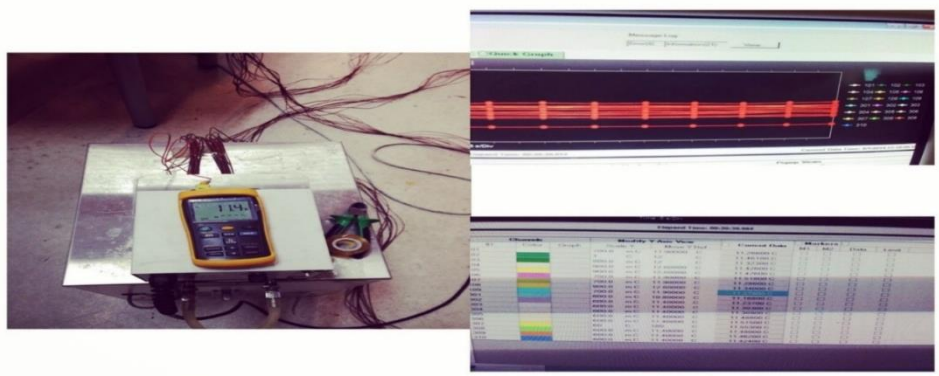


(a) (b)

Şekil 5. 3 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre, veri toplayıcı

Bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline yerleştirilecek olan ısıl çiftlerin kalibrasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra Referans sıcaklık ile Ölçülen sıcaklık ilişkisini gösteren doğru denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen her bir ısıl çift için kalibrasyon doğru denklemleri Ek 1'de verilmiştir.

Kalibresi yapılan ısıl çiftler kaynak ısı değiştiricilerine bağlanmak üzere Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvarına götürülmüştür.



Şekil 5. 4 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre, Benchlink programı

Hafriyatı alınmaya devam ederken iş-akış planlaması yapılmak üzere gittiğimiz Merkez laboratuvarı alanının tesviye yapılmadan önceki görüntüsü Şekil 5.5a ve 5.5b'de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. 5 Hafriyatın alınması (a), Tesviyenin yapılması (b) ve Tesviye sonrası hafriyat alanı (c)

YTÜ Yapı İşleri Daire Başkanlığı, inşaatın yapımını üstlenen yüklenici firma, Mir-ARGE ve proje çalışanlarıyla toplantı gerçekleştirilmiş ve boruların nasıl yerleştirileceği, kanalların nasıl açılacağı ve boruların zarar görmeden nasıl üstünün kapatılacağı üzerine toplantılar yapılmıştır. Merkez laboratuvarı alanının tesviyesi yapıldıktan sonraki görüntüsü Şekil 5.5c'de verilmiştir.

5.2 Deney Tesisatının Kurulumunda temel altı çalışmalar

Kaynak ısı değiştiricilerinin yerleşimi ile ilgili yapılan toplantılar neticesinde, bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline olmak üzere kaynak ısı değiştirici borularının yerleştirilmesi planlanmıştır. Kaynak ısı değiştiricilerinde kullanılan boruların uzunluğu 85 m, çapı 32 mm ve 10 adet paralel Polietilen (HDPE) borudan oluşmaktadır.

Bina temelinin altındaki toprağa gömülecek olan Toprak hattı uygulaması için JCB kullanılarak kazı çalışması yapılmıştır. Toprak hattı yerleşiminde 10 adet paralel boru bulunmakta olup her birinin uzunluğu yaklaşık olarak 85 m'dir (Şekil 5.6).



(a) (b)

Şekil 5. 6 Toprak hattı uygulaması için kazı çalışmaları ve yerleşimi

Toprak hattının yerleşimi tamamlandıktan sonra üzerleri deniz kumu ile kapatılmıştır (Şekil 5.7). Bunun nedeni, borular toprağa gömülmüş olsa dahi üzerlerine binanın statiğinin sağlanması açısından konulan küçük çaplı mekanik malzemenin gönyede olacak şekilde JCB yardımıyla dağıtılması söz konusu olduğundan dolayı, JCB'nin üzerinden geçtiğinde boruların ezilmesi veya zarar görmesi durumuna karşı bu önlem alınmıştır



Şekil 5. 7 Toprak hattı uygulamasında boruların üstünün deniz kumuyla kapatılması

Tesviyesi yapılmış hafriyatın üzerine boyutları farklı olan küçük çaplı mekanik malzemeler serpilir ve JCB yardımıyla bu malzeme alanda gönyede olacak şekilde dağıtılır. Bu işlem tamamlandıktan sonra yaklaşık 10 cm yüksekliğinde grobeton atılır. Bu küçük çaplı mekanik malzeme farklı boyutları olup genelde ucuz olmasından dolayı tüvenan malzemeden yapılan duvar taşı kullanılır.



(a)



(b)

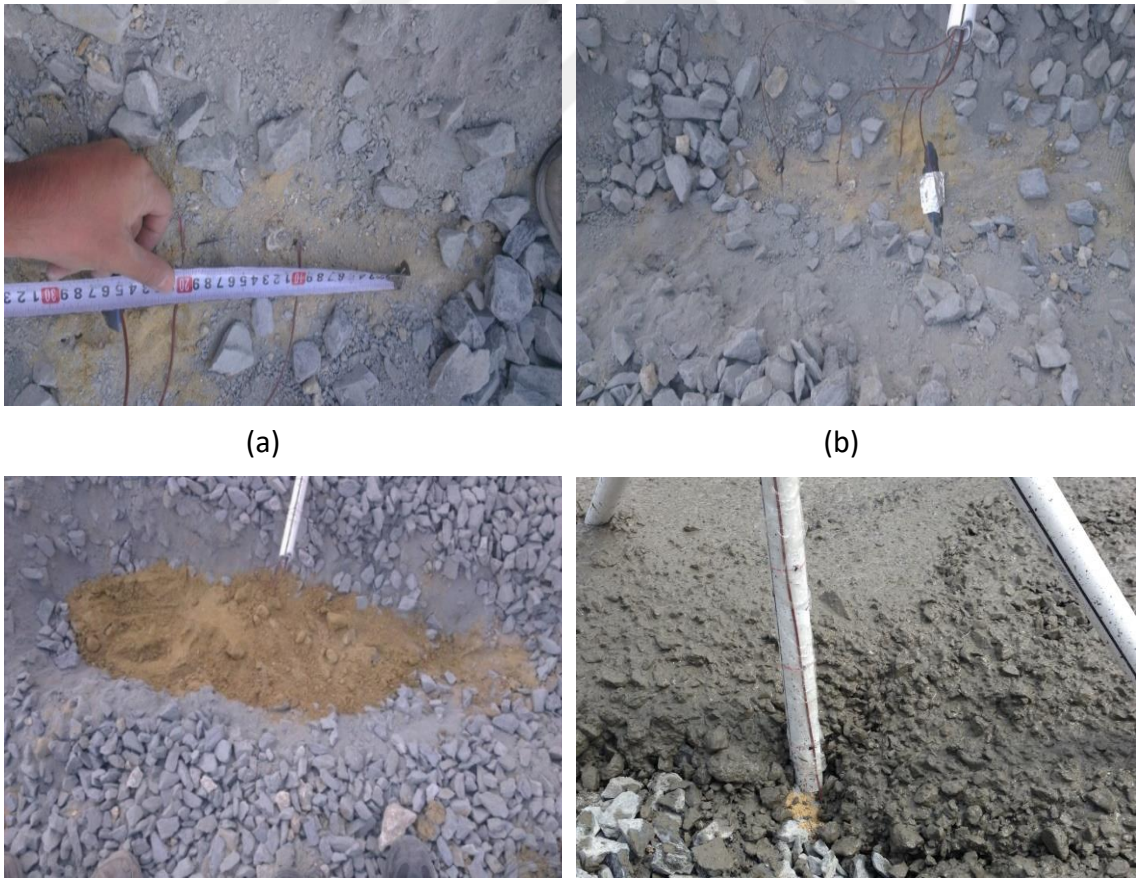


(c)

Şekil 5. 8 Alana küçük çaplı mekanik malzemenin yerleştirilmesi ve JCB ile düzleştirilmesi

Duvar taşı malzemesi büyük boyutlara sahip taş olması, toprağa yerleştirilen borulara zarar vermesi düşünüldüğünden yüklenici firma ile görüşülüp bu mekanik malzemenin 5-15 mm boyutlarında mıcır olan küçük çaplı mekanik malzemenin konulması uygun görülmüştür. Bu kapsamda, kamyonetlerle getirilen küçük çaplı mekanik malzemenin, boruların üzerlerinden geçmemesine dikkat edilerek belirle noktalara malzeme bırakılmıştır. Bırakılan bu küçük çaplı mekanik malzeme JCB yardımıyla inşaat alanına dağıtılmıştır (Şekil 5.8).

Toprak hattı uygulaması için toprakta sıcaklık dağılımını ölçmek için dikey ve yatay olarak yerleştirilen ısıl çiftler kullanılmıştır. Toprağa gömülen 10 adet Toprak hattı için ısıl çiftlerin yerleşimi yapılırken, kaynak ısı değiştiricinin tam ortasındaki boru belirlenmiş olup ve o boru hattına önceden kararlaştırılan belirli mesafelerde yatay ve dikey olarak ısıl çiftler yerleştirilmiştir (Şekil 5.9). Küçük çaplı mekanik malzemenin üstüne atılacak olan grobetonun içinde kalacak şekilde Toprak hattı için bir adet ısıl çift bağlanmıştır (Şekil 5.9d).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 5. 9 Toprak hattına ait ısıl çiftlerin bağlanması



Şekil 5. 10 Grobeton dökülürken alanın görünümü

Şekil 5.10'da grobeton dökülürken alanın görünümü verilmiştir. Grobeton uygulaması sonrası radye-temel altında kalacak olan bohçalama yalıtımı diye bilinen membran türü yalıtım malzemesi uygulanmış ve sonrasında üzerine 5 cm'lik koruma betonu atılmıştır. Koruma betonu, radye-temel atılmadan önce demir döşenirken yalıtım malzemesinin zedelenmesini önlemektedir. Koruma betonun üzerine Toprak hattı için bir adet ısıl çift bağlanmıştır (Şekil 5.11).



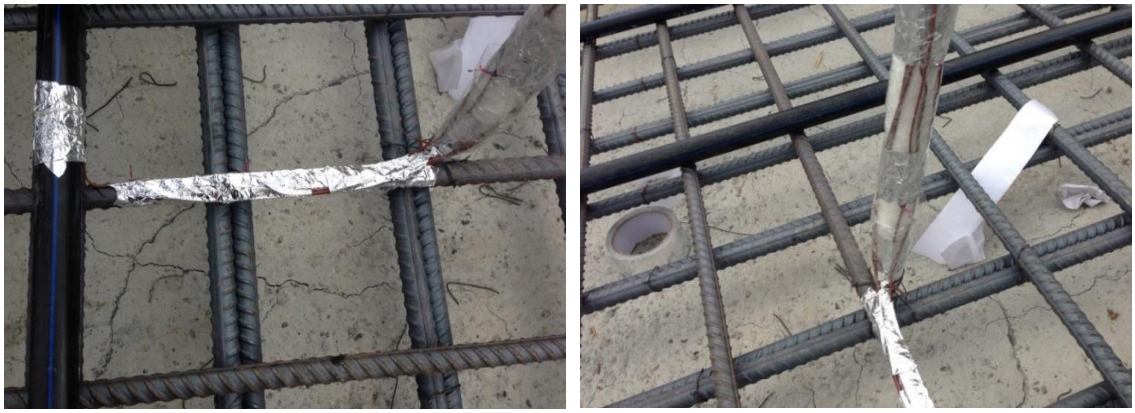
Şekil 5. 11 Toprak hattına ait ısıl çift yerleşimi



(a) (b)

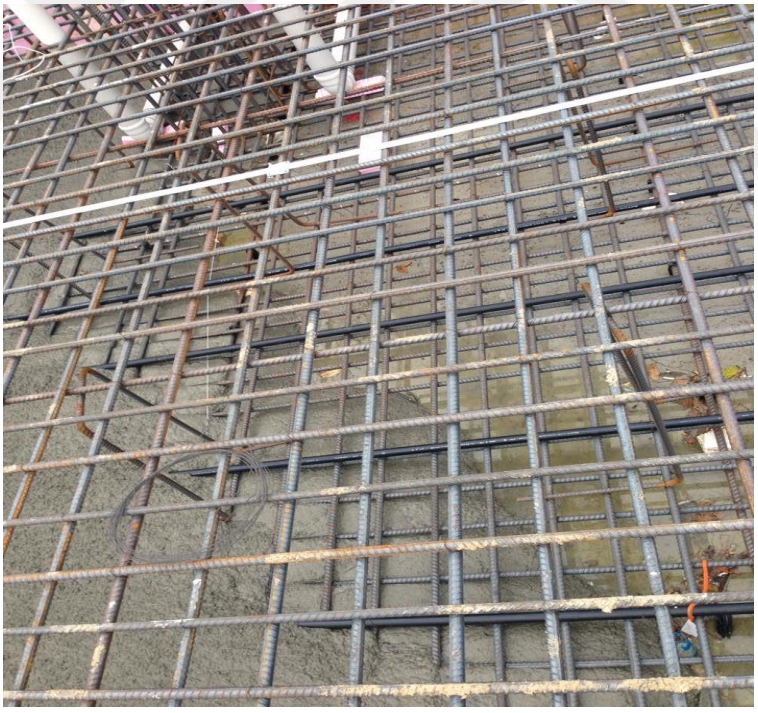
Şekil 5. 12 Beton hattı uygulaması için boruların yerleştirilmesi

Beton hattı uygulaması için, radye-temelin demirleri döşenirken borular yerleştirilmiş ve ısıl çiftler bağlanmıştır (Şekil 5.12 ve 5.13).



Şekil 5. 13 Beton hattı uygulamasında ısıl çiftlerin bağlanması

Radye-temel betonu atılmadan önce temel demirleri uygulanırken yerleştirmiş olduğumuz ısı değiştirici borularının, temel betonu uygulandığı esnadaki görünümü Şekil 5.14'de verilmiştir.

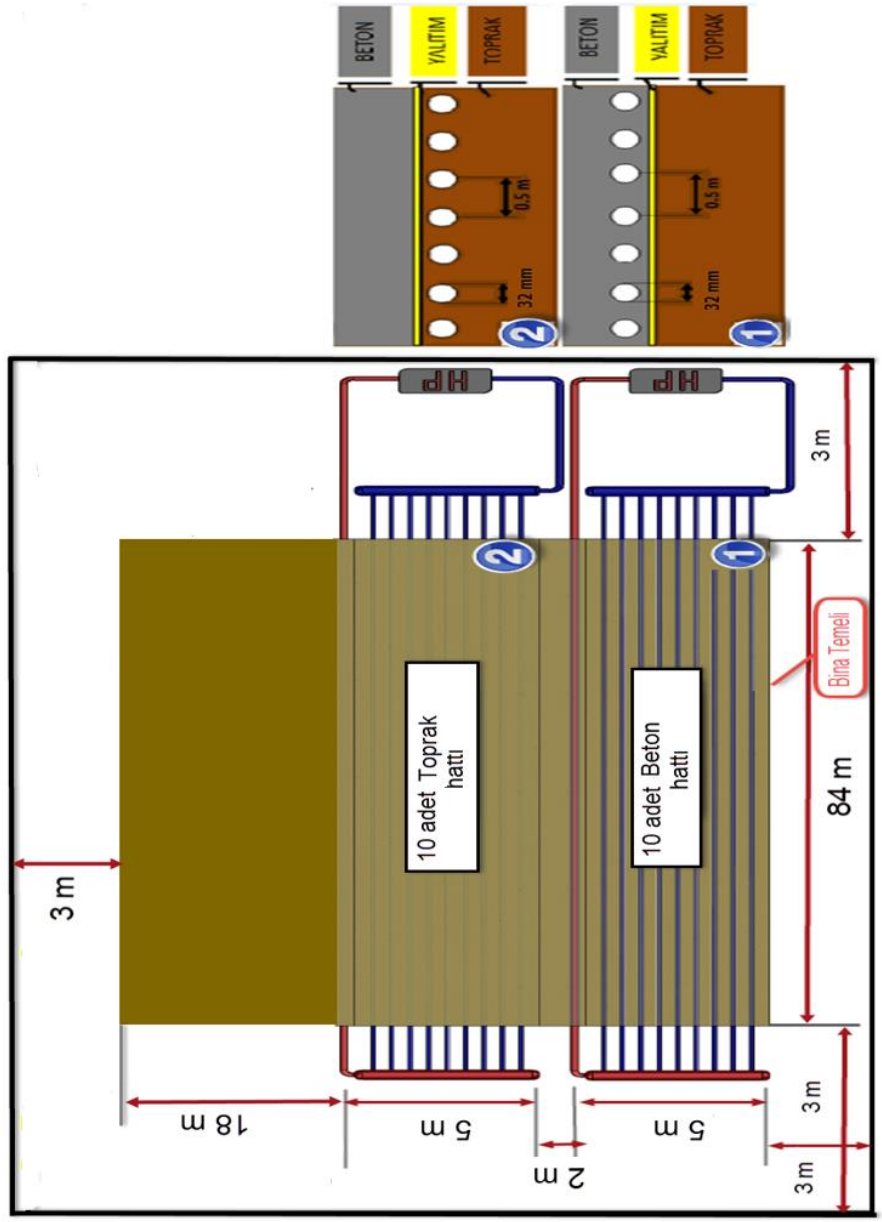


Şekil 5. 14 Donatılı beton atılırken boruların görünümü

Özetle, binanın temelinin altındaki toprağa yerleştirilen Toprak hattı ve bina temeline yerleştirilen Beton hattının şematik olarak binaya uygulanış biçimi Şekil 5.15'de verilmiştir. Bina boyunca (85 m) 10 adet Toprak ve Beton hatları, bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline yerleştirilmiştir. Yerleştirilen tüm boruların çapı 32 mm olup

yüksek yoğunluklu polietilen malzeme kullanılmıştır. 10 adet paralel Toprak ve Beton hatları uygulamalarındaki borular arası mesafe 0.5 m'dir.

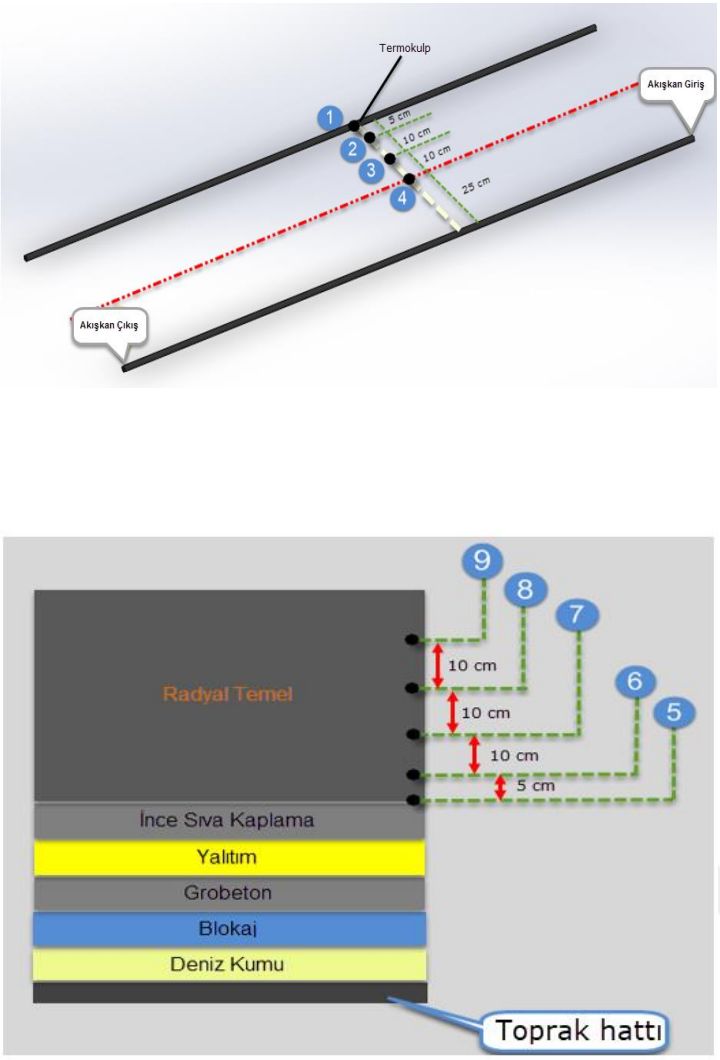
YTÜ Merkez Laboratuvarının bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline uygulanan kaynak ısı değiştiricilerinin şematik görünümü Şekil 5.15'de verilmiştir. Bu sistemlere ait ısıl çiftlerin yatayda ve dikeyde yerleşiminin daha iyi anlaşılması için Toprak ve Beton hatları uygulamalarının ısıl çift yerleşimi sırasıyla Şekil 5.16 ve 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 15 Bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline yerleştirilen Toprak ve Beton hatlarının şematik görünümü

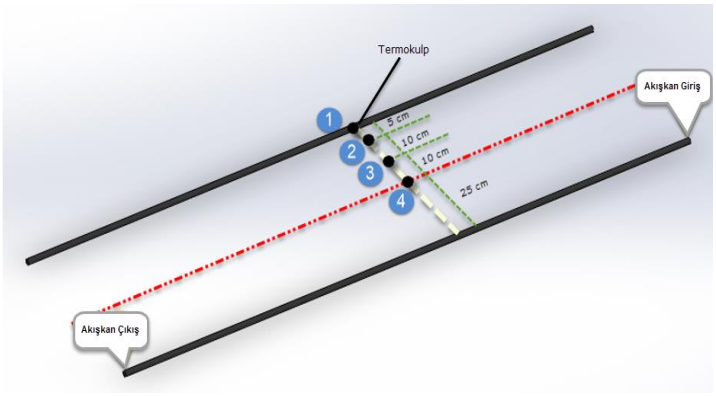
a-)

b-)

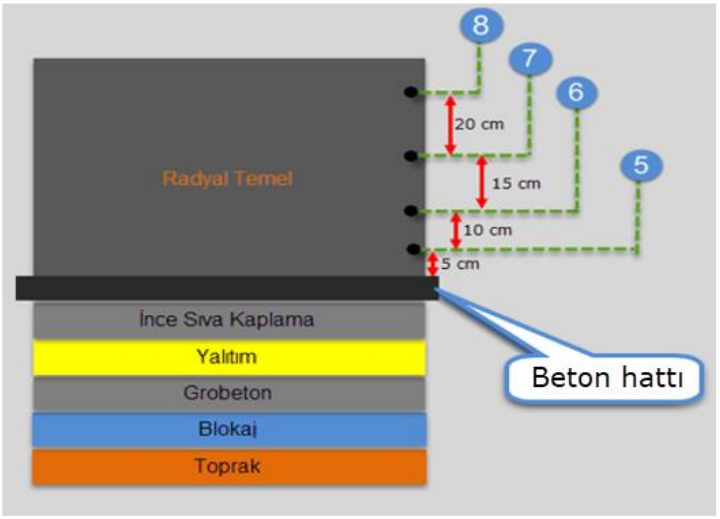


Şekil 5. 16 Toprak hattı uygulaması için ısıl çiftlerin yatay (a) ve dikey (b) yerleşiminin görünümü

a-)



b-)



Şekil 5. 17 Beton hattı uygulaması için ısıl çiftlerin yatay (a) ve dikey (b) yerleşiminin görünümü

5.3 Deney Tesisatının Kurulumunda Bina Dışı Çalışmalar

Kolektör bağlantıları yapıldıktan sonra binanın perde duvarı delinip kolektör uçlarının binanın içine girişi sağlanmıştır. İnşaat sektöründe karot olarak bilinen Şekil 5.18'da görüldüğü gibi bu delme işlemi, binanın 2 yan perde duvarında olacak şekilde 4 adet uygulanmıştır. Karot delinmesi sonucunda binanın içine alınan kolektör boruları ısı pompası odasına taşınması için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5. 18 Karot delinmesi ve boruların bina içine alınması

Merkez Laboratuvar ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının bir ucu bulunurken, bina malzeme giriş kapısının olduğu bölümdeyse diğer uçları

bulunmaktadır (Şekil 5.19). Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının uçları kaplin bağlantıları yapılarak uzatılmış ve bina dışına yani binanın uzun kenarının olduğu ve üstü kapatılmayacak olan bölgeye taşınmıştır. (Şekil 5.20). Bunun sebebi, bina altındaki borularda kaçak olması veya kolektör bağlantılarında problem yaşanması durumunda bina altındaki o hattın, kolektör üzerinden uçları kör topa edilebilmesi gibi müdahale şansı olmasıdır. Kaplin bağlantılarıyla uzatılan borular ve kolektör gidiş-dönüş hatları, bina yan taraflarında inşa edilen perde duvarlarda tekrardan karot delinmesiyle bina yan tarafına alınmıştır.



Şekil 5. 19 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının görünümü



Şekil 5. 20 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının kaplin bağlantılarının görünümü

Bina ana giriş kapısı bölümündeki Toprak ve Beton hatları bina dışına kaplin kullanılarak alındıktan sonra boruların üstü taş yünüyle kaplanmıştır. Sonrasında çok ince kum ile kaplanmıştır (Şekil 5.21a ve 5.21b). Bunun sebebi üzerlerine yük gelen boruların zarar ve zedelenmesini önlemek için yapılmıştır. Boruların üzerine ince kum uygulandıktan sonra Şekil 5.22'de görüldüğü gibi küçük çaplı mekanik malzeme dökülmüş, sonrasında da grovak malzeme ile silindir yapılarak doldurulmuş olup son hali Şekil 5.23'de görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 5. 21 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin izolasyon ve ince kum ile kapatılması



Şekil 5. 22 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin küçük çaplı mekanik malzeme kapatılması



Şekil 5. 23 Bina ana giriş kapısının olduğu bölümde Toprak ve Beton hatlarının üzerlerinin kapatıldıktan sonraki görünümü

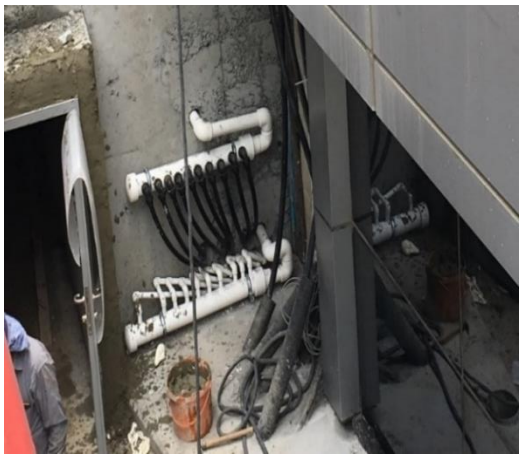
Merkez laboratuvar binasının malzeme giriş kapısının bulunduğu taraftaki Toprak ve Beton hatlarının diğer uçlarının bağlantıları yapılmak üzere perde duvarlar karot delinmesi suretiyle kolektör uçları bina içerisine alınmıştır. Aynı şekilde, Toprak ve Beton hatlarının uçları bina dışına alınmak üzere kaplin bağlantısı yapılarak borular uzatılmıştır. Uzatılan borular bina yan perde duvarlarına karot delinmesinden sonra bina dışına alınmıştır (Şekil 5.24).



Şekil 5. 24 Toprak ve Beton hatlarına ait kolektör bağlantılarının görünümü

Bina dışına alınan Toprak ve Beton hatlarının bağlantıları yapılarak kolektör dizaynı yapılmıştır. Bina ana ve malzeme giriş kapılarının olduğu bölümlerde Toprak ve Beton hatlarının kolektörleri Şekil 5.25'de verilmiştir.





(a) (b)

Şekil 5. 25 Toprak ve Beton hatlarının bina ana giriş kapısının olduğu bölümde (a), bina malzeme giriş kapısının olduğu bölümde (b) kolektör bağlantılarının görünümü





Şekil 5. 26 Kolektörlerin etrafının sac levhalarla kapatılması



Şekil 5. 27 Kolektörlere ait izolasyon çalışmasının görünümü

Bina dışında bulunan kolektörlerin hem güvenlik hem de hava şartlarından (yağmur ve kar gibi) etkilenmemesi için etrafının kapatılması gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.26).

Etrafı kapatılan kolektörlerin izolasyon işlemlerine geçilmiştir. İzolasyon çalışması kapsamında sac levhaların iç bölümleri XPS köpük malzemelerle kaplanmış olup boruların üzerlerine ise camyünü malzemesi kullanılarak kolektörlerden dışarıya olabilecek ısı kayıplarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır (Şekil 5.27). Tüm kolektörler için, Şekil 5.27'de görüldüğü şekilde izolasyon çalışması yapılmıştır.

5.4 Deney Tesisatının Kurulumunda Bina İçi Çalışmalar

5.4.1 İnşaat ve Borulama

Karot delinmesi ile binanın içine alınan boruların, dönüş hatlarının bağlantıları yapılarak tesisat odasına alınmıştır. Toprak ve Beton hatlarının dönüşleri bina içerisinden yapılmıştır. Bu hatlarda yüksek basınç düşümünü engellemek amacıyla büyük boru çapları ile dönüş sağlanmıştır (Şekil 5.28).



Şekil 5. 28 Toprak ve Beton hatları uygulamalarına ait dönüş hatlarının görünümü

Toprak ve Beton hatları uygulamalarına ait dönüş hatları, YTÜ Yapı-İşleri Daire Başkanlığı ve Merkez Laboratuvar yönetimiyle önceden belirlediğimiz ısı pompası odasına taşınarak, ısı pompalarına bağlantılarının yapılması için hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.29 ve Şekil 5.30a).





(a) (b)

Şekil 5. 29 Toprak ve Beton hatları uygulamalarına ait dönüş hatlarının ısı pompası odasına taşınması sonrası görünümü





(a) (b)

Şekil 5. 30 Tesisat odasında dönüş hatları ve ısı pompalarının kurulumunun görünümü

Isı pompası odasına taşınan Toprak ve Beton hatları için 11 kW'lık su kaynaklı ısı pompası temin edilmiştir. Isı pompalarının her birinin üzerinde akümülasyon ve genleşme tankları, akış kontrolörleri, pompalar, pislik ve tortu tutucular, manometreler ve termometreler bulunmaktadır. Şekil 5.30b ve 5.30c'de dönüş hatları, ısı pompası ve ekipmanlarının montajı görülmektedir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, ısı pompası odasından ısıtma-soğutma yapılacak mahallere borulama çalışması yapılmıştır. Toprak ve Beton hatlarına ait ısı pompaları birbirine eşdeğer alana sahip mahalleri beslemektedir. Her bir mahal 2 oda olup toplamda 4 odadır. Bu 4 odanın ısıtma-soğutma sistemi hava apareyleriyle sağlanacak

olup, bu bağlamda 4 adet hava apareyi temin edilmiştir. Şekil 5.31'de görüldüğü üzere bodrum katta bulunan tesisat odasından giriş katta bulunan ısıtma-soğutma yapılacak mahallere, elektrik sistem odasının içinden geçilerek üst kata ulaşılmıştır.



(a) (b)

Şekil 5. 31 Isı pompası odasından ısıtma-soğutma yapılacak mahallere çekilen borulamanın görünümü



(a) (b)



(c)

Şekil 5. 32 Toprak ve Beton hatlarının ısıtma-soğutma yapılacak mahallere taşınması ve tavan arası borulamanın görünümü

Bu borulama işleminde tavana rotlar atılarak sağlamlaştırılmıştır. Isı pompası odasından mahallere gidiş hattı ve mahallerden ısı pompasına dönüş hatları için borulama ve izolasyon çalışması Şekil 5.31a ve 5.31b'de görülmektedir. Şekil 5.32a, 5.32b, 5.32c'de görüldüğü üzere alansal olarak eşdeğer 2 mahallin, tümü için borulama yapılırken her bir mahal bir gidiş ve bir dönüş olmak üzere 2 hatla girilmiştir.

Mahaller içindeki 4 adet hava apareyine, ısı pompası odasından mahallere getirilen boruların bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Toprak ve Beton hatları için 4 adet hava apareyi bağlantısı (her bir sistem için 2 adet) yapılmıştır. Her bir kaynak ısı değiştirici 2 adet hava apareyini bağlanmaktadır. Örneğin; Toprak hattı tesisat odasından mahallere 1 gidiş ve 1 dönüş hattıyla bağlı olup, gidiş hattı mahallerden içeri girdiğinde ikiye ayrılıp 2 farklı hava apareyine bağlanmaktadır. Sonra bu 2 hava apareyinin dönüş hatları birleşerek tekrardan Toprak hattının dönüş hattına bağlanarak ısı pompası odasına dönmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. 33 Mahallerde bulunan hava apareyleri ve bağlantılarının görünümü

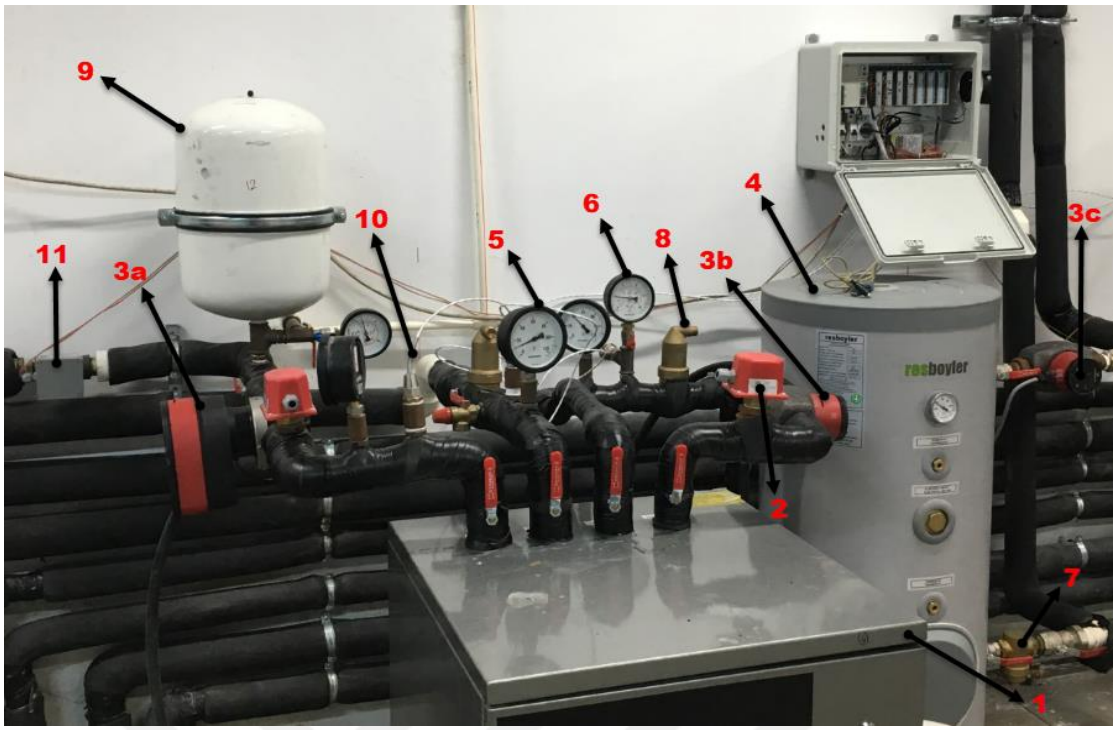
Şekil 5.33a, 5.33b, 5.33c'de görüldüğü üzere, hava apareyinin oda içinden görünümü ve kaynak tarafından gelen gidiş-dönüş hatlarının hava apareyine bağlantısı verilmiştir.

5.4.2 Isı pompası tesisatının tanıtımı

Yukarıda bahsedildiği üzere ısıtma-soğutma yapılacak mahaller için 4 adet hava apareyi, kaynak tarafında ise bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline gömülü Toprak ve Beton hatları bulunmaktadır (Şekil 5.34). Bu iki devre arasında bağlantının gerçekleştiği yer, Su kaynaklı ısı pompalarının bulunduğu ısı pompası odasıdır. Isı pompası odasında Toprak ve Beton hatlarına ait 2 adet Su kaynaklı ısı pompası bulunmaktadır. Grup halinde tüm sistemin ısı pompası odasındaki görünümü Şekil 5.34'de görülmektedir. Şekil 5.35'de görüldüğü üzere bir ısı pompasının üzerinde tüm ekipmanlar numaralandırılarak gösterilmiş olup Çizelge 5.1'de tüm bileşenlere ait model, marka ve özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. 34 Isı pompası tesisatının grup halinde görünümü



Şekil 5. 35 Bir ısı pompası üzerindeki ekipmanlar

5.4.3 Isı Pompası Üzerindeki Elemanların Tanıtımı

1- Toprak Kaynaklı Isı Pompası

Konfor amaçlı kullanılan ısı pompaları, yazın gerekli soğutmayı, kışın ise gerekli ısıtmayı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Isı pompaları kışın dış ortamdaki düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından, yüksek sıcaklıktaki iç ortama ısı pompalarlar. Yazın ise iç ortamdaki ısıyı tam tersine dış ortama atarlar. Burada dış ortamdan kasıt hava ile toprak, göl ve benzeri yer üstü suları ile yer altı sularıdır. Bu çalışmada kaynak tarafı toprak ve beton olurken, iç mahalde ise odalar için hava apareyleri ile bulunmaktadır. Yani, toprağa veya betona yerleştirilen borular yardımıyla su, toprakta ve betonda dolaşarak ısıtılır ya da soğutulur. Isıtılan ya da soğutulan su, ısı pompasına girer ve oradan da iç mahallerin ihtiyacına göre pompalanır. Pompalanan su, 2 mahalde bulunan hava apareylerine gidip sudan havaya ısı aktarılması şeklinde çalışmakta ve odanın ihtiyacını karşılamaktadır. Sistemimizde RESTHERMA'nın sudan suya ısı pompası kullanılmıştır. Teknik verileri Şekil 5.36'da verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Isı pompası üzerinde bulunan ekipmanların kritik özellikleri

Eleman	Teknik Özellikler
1- Toprak Kaynaklı Isı Pompası	Üretici: Restherma, Model: IP11SS Isıtma: Nominal kapasite: 10.5kW, Çekilen güç:2.1 kW, COP:5, Çalışma sıcaklık aralığı:-5/+45°C, Maks. çıkış suyu sıcaklığı: 55°C Soğutma: Nominal kapasite: 8.5kW, Çekilen güç:1.98 kW, EER:4.29, Çalışma sıcaklık aralığı:+10/+43°C, Maks. çıkış suyu sıcaklığı: 7°C
2- Akış Kontrol Şalteri	Üretici: Ayvaz, Model: AK 100, Çap:16mm
3- Pompa Grubu	**3a:** Üretici: Grundfos, Model: MAGNA3 25-100, Maks. debi: 78.5 m^3/h, Maks. basma yüksekliği: 18 m, Maks. sistem basıncı : 16 bar, Sıvı sıcaklığı.: -10/110°C **3b ve 3c:** Üretici: Grundfos, Model: Alpha2 25-80-180 Maks. debi: 4.8 m^3/h, Maks. basma yüksekliği: 5.8 m, Maks. sistem basıncı: 10 bar, Sıvı sıcaklığı: 2/110°C
4- Akümülasyon Tankı	Üretici: Resboyler, Model: KAT, Kapasite: 100 lt , Test basıncı: 13 kg/cm^2, İşletme basıncı: 10 kg/cm^2
5- Termometre	Üretici: Pakkens, Model: TE100DB1, Ölçü aralığı: -30/+60°C, Sıcaklık elemanı: Bi-metal
6- Manometre	Üretici: Pakkens, Model: MG063DRM1, Ölçü aralığı:0-10 bar
7- Pislik Ayırıcı	Üretici: Reflex, Model: Exdirt, Maksimum çalışma sıcaklığı: 110 °C, Maksimum çalışma basıncı: 10 bar
8- Hava Ayırıcı	Üretici: Reflex, Model: Exvoid T, Maksimum çalışma sıcaklığı: 110°C, Maksimum çalışma basıncı: 10 bar
9- Genleşme Tankı	Üretici: Reflex, Model: 15P1125, Çalışma sıcaklığı:-10/120°C, Maks. çalışma sıcaklığı, membran: -10/70°C, Ön dolum basıncı: 1,5 bar, Çalışma basıncı: 6 bar, Hacim: 23L
10- RTD	Üretici: Tekon, Model: PT100, Ölçme aralığı: 0/100°C
11- Debimetre	Üretici: Bass, Model: FMPV, sıcaklık: -10/70°C , Basınç: 10 bar maks.

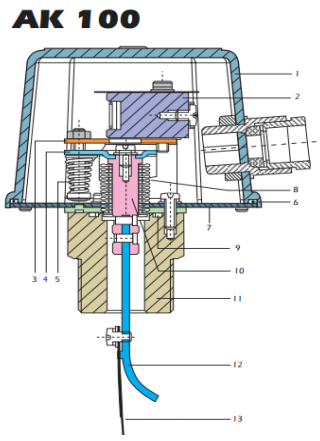
TEKNİK DEĞERLER			IP11SS
ISITMA	Nominal Kapasite *	kW	10,5
	Çekilen Güç	kW	2,1
	COP	W/W	5,00
	Çalışma Sıcaklığı Aralığı	°C	-5 / + 45
	Maksimum Çıkış Suyu Sıcaklığı	°C	55
SOĞUTMA	Nominal Kapasite **	kW	8,5
	Çekilen Güç	kW	1,98
	EER	W/W	4,29
	Çalışma Sıcaklığı Aralığı	°C	+10 / +43
	Minimum Çıkış Suyu Sıcaklığı	°C	7
Gerilim		V / PH / HZ	220~240/1/50
Soğutucu Akışkan			R 410 A
Kompresör		Tip	SCROLL
		Marka	DAIKIN
		Miktar	1
Ambalajlı Boyutlar	Genişlik	mm	680
	Derinlik	mm	550
	Yükseklik	mm	975
	Ağırlık	kg	86
Net Boyutlar	Genişlik	mm	600
	Derinlik	mm	470
	Yükseklik	mm	855
	Ağırlık	kg	80
Sirkülasyon Pompası Debisi		m^3/h	1,3
Cihaz Basınç Kaybı		Kpa	1,2
Sirkülasyon Pompası		Marka	YOK
Giriş Çıkış Boru Çapı		mm	G1"
Kablo Kesiti		mm^2	3x2,5 mm^2
Sigorta		A	25 A.(NC-C)
Drenaj Boru Çapı		mm	Ø25mm
Oda Kumandası Kablo Kesiti		mm^2	4 x 0,75

Şekil 5. 36 IP11SS teknik verileri

2- Akış Kontrol Şalteri

Akış kontrol şalterleri ısıtma, havalandırma, soğutma ve diğer tesisatlar da güvenlik donanımı olarak veya bir akımın varlığını haberdar etmek için kullanılır. Akış bilgisi almak için panolara bağlanır. Yangın sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Yangın sistemlerinde, yangın söndürme sistemi çalıştığında panoya sinyal gönderir ve alarm ikazını yakar. Bu sayede yangının hangi noktada olduğunu bulmayı kolaylaştırır. Pompanın debisini kontrol ederek açık ya da kapalı olduğunu belirtebilir Akış debisi istenenden çok fazla veya çok az olduğunda önlem alınması için alarm verebilir. Dezavantajı ise bir miktar basınç kaybına yol açar. Şekil 5.37'de akış kontrolörü gösterilmiştir.





Şekil 5. 37 Akış Kontrol Şalteri

3- Pompa Grubu

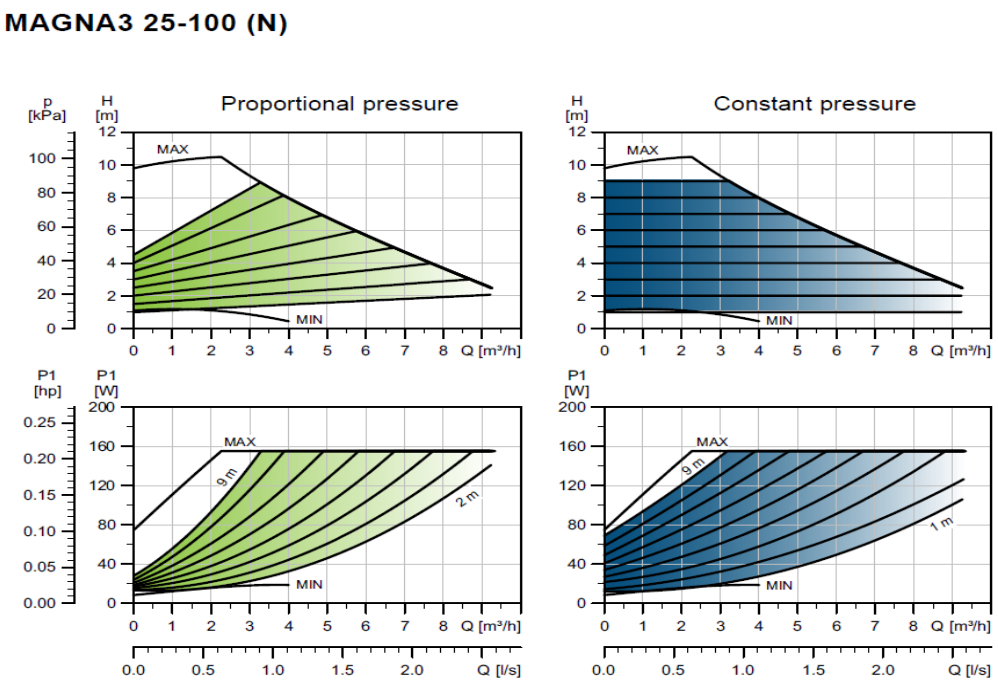
Pompa bir akışkanı basınçlandırmayı ve bir yerden başka bir yere kütlesel transferini sağlayan mekanik bir cihazdır. Toprak tarafından dönen suyu basmak için 1 adet frekans kontrollü pompa (a) ve suyu mahalle basmak için 1 adet rotorlu pompa (b) kullanılmıştır (Şekil 5.38). Pompalara ait hidrolik değerler Şekil 5.39'da verilmiştir.



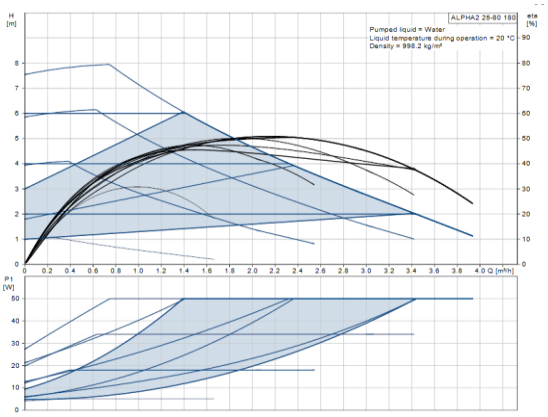


(a) (b)

Şekil 5. 38 Pompalar, (a) frekans kontrollü pompa, (b) rotorlu pompa



(a)



(b)

Şekil 5. 39 Pompa grafikleri (a) frekans kontrollü pompa (b) rotorlu pompa

4- Akümülasyon Tankı

Akümülasyon tankı ısı pompaları veya güneş sistemleri gibi çeşitli kaynaklardan gelen ısılarla tank içindeki suyu ısıtarak depolamayı sağlayan bir sistemdir. Akümülasyon tanklarından eşanjör kullanılarak sıcak su temin edilir. Özellikle serpantinli boylerlerin düşük kaldığı yüksek su ihtiyaçlarında akümülasyon tankı kullanmak en doğrusudur. Akümülasyon tankları tüm ısıtma sistemlerinden en yüksek derecede verim almaktadırlar. Isıtma kaynaklarının ömrünü uzatmakla birlikte ısıtma maliyetlerini de düşürürler. Yani temel amacı sıcak su ihtiyacı olan yerlerde sıcak suyu ısı kaynağından temin edip depolamaktadır (Şekil 5.40a).





(a) (b)

Şekil 5. 40 Akümülasyon tankı (a) ve Termometre ve Barometre (b)

5- Termometre

Analog termometre bulunduğu hat üzerindeki sistemin sıcaklığını kontrol eden bir cihazdır. Kullanıcıya görsel bir veri sunar ve herhangi bir veri kaydı gerçekleştirmez.

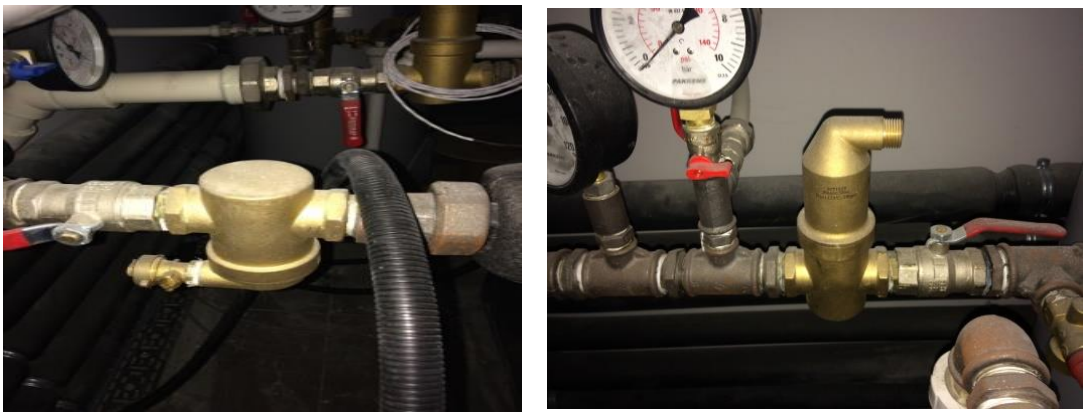
6- Barometre

Analog barometre bulunduğu hat üzerinde sistemdeki akışkanın basıncını kontrol eden bir cihazdır. Kullanıcıya görsel bir veri sunar ve herhangi bir veri kaydı gerçekleştirmez. Şekil 5.40b'de termometre ve barometre gösterilmiştir.

7,8- Pislik Tutucu ve Hava Atıcı

Hat içerisindeki suyun içinde bulunan veya borularda daha önceden birikmiş pislik veya tortuyu hassas parçalara zarar vermemesi veya tıkamaması için filtreleyen cihaza pislik tutucu denir. Pislik tutucular, su besleme boru hatlarında hat üzerinde bulunan pompa kompresör, ölçüm cihazları ve basınç düşürücü gibi ekipmanların suyun içindeki partiküllerden hasar görme olasılığını azaltmak için kullanılır. Hava ayırıcılar artan su sıcaklığından, basınç farkından veya kavitasyondan dolayı ortaya çıkan hava kabarcıklarının sistemden atılmasını sağlarlar. Hava kabarcıkları sistemlerde;

- Isıtma ve soğutma sistemlerinde oksijen korozyonuna neden olur.
- Pompalarda ve tesisat elemanlarında kavitasyona neden olur.
- Isı transfer yüzeylerine yapışarak ısı transferini engeller.
- Sistemde ses ve titreşime neden olur.



(a) (b)

Şekil 5. 41 Pislik tutucu (a) ve hava atıcı (b)

Bu etkileri önlemek için tesisat sistemlerinde hava atıcı bileşenler kullanılır. Bunlar manuel olabileceği gibi mekanik de olabilir (Şekil 5.41).

9- Genleşme Tankı

Devreye alımda basılan su genellikle oda sıcaklığının altındadır. Sistem çalışmaya başladığında, sistemin amacı ısı pompalamak olduğundan hat içerisindeki su ısınır ve genleşir. Bu hat içerisinde statik bir basınç yaratır. Bu basıncın artması hat üzerindeki ekipmanlar veya borular için hasar verici sonuçlar doğurabilir. Bunun önüne geçmek için hattın üst bölümüne herhangi bir hacim artışını egale etmek için balans tankları yerleştirilir. Muhtemel bir hacim artışı durumunda hat içindeki su bu tanka geçer. Ve aynı şekilde bir hacim düşüşü olduğu zaman bu tank tekrar hattı besler (Şekil 5.42a).

10- RTD

Rezistans termometreler, termokupllara göre daha düşük sıcaklıklarda kullanılan (-200, +850) sıcaklık ölçüm elemanlarıdır. Termokupllara göre daha kararlıdırlar, daha hassas ölçüm yapabilirler. PT25, PT100, PT1000 gibi çeşitleri bulunmaktadır. Bizim sistemimizde P100 RTD kullanılmıştır. RTD'lerde bulunan algılama elemanı genellikle bir platin tel sargısı veya seramiğe uygulanmış ince bir metalik tabakadır. Platinler sıcaklığa karşı çok kararlıdır ve oksidasyon ve korozyondan etkilenmezler. Rezistans termometreler hassaslık, uzun süreli elektriksel direnç kararlılığı, eleman doğrusallığı ve tekrarlanabilirliği gibi özellikler isteyen uygulamalarda örneğin; laboratuvarlarda endüstriyel proseslerde kullanılırlar (Şekil 5.42b).

11-Debimetre

Kaynak ısı değiştiricilerinin dönüş hatlarına türbin-tipi debi ölçer bağlanarak debinin ölçümü sağlanmıştır. Bir güç kaynağı kullanılarak PLC sistemine entegre edilen debimetreden ölçümler alınmıştır (Şekil 5.43a).

12-PLC sistemi

Kaynak tarafında suyun gidiş ve dönüş sıcaklıklarının ve debinin ölçülmesi için PLC sistemi kullanılmıştır. Şekil 5.43b'de görüldüğü üzere debimetrenin ölçülmesi için bir güç

kaynağı kullanılarak PLC sistemine entegre edilmiştir. Aynı şekilde, RTD'lerde PLC sistemine bağlanarak ölçümler alınıp kaydedilmektedir.

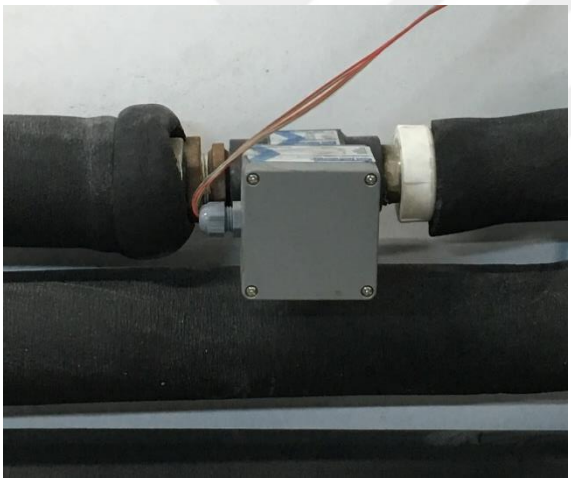


(a)



(b)

Şekil 5. 42 Genleşme Tankı ve RTD



(a)



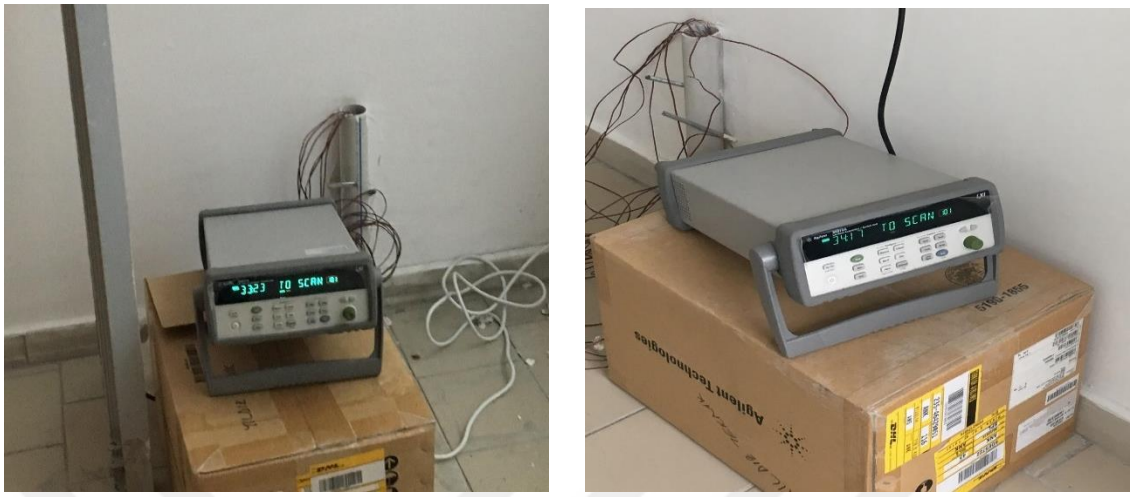
(b)

Şekil 5. 43 Türbin-tipi debimetre (a) ve PLC sistemi (b)

13-Veri toplama ünitesi

Binanın temel çalışmalarında Toprak ve Beton hatları için yatayda ve dikeyde olacak şekilde yerleştirilen ısıl çiftler kanal toplacısına bağlanarak veri toplama ünitesine entegre edilmiştir. Veri toplama ünitesi kullanılarak Toprak ve Beton hatları için yatayda ve dikeyde yerleştirilen ısıl çiftlerden ölçümler alınmıştır. Saatlik olarak ölçülen yatayda

ve dikeydeki toprak ve beton sıcaklık verileri Agilent marka 34972A model veri toplama ünitesine entegre edilen harici belleğe kaydedilmiştir (Şekil 5.44).



(a) (b)

Şekil 5. 44 Toprak (a) ve Beton (b) hatları için ısıl çiftlerin veri kaydedicisi kullanılarak ölçümünün yapılması

5.5 Deneysel Sonuçlar

8 Şubat 2018 saat 11.00'de Toprak ve Beton hatları için deneylere başlanmıştır. 13 Mart 2018 saat 11.00'e kadar toplam 864 saatlik veri alınmıştır. Bu süre boyunca sistem iki mahallin ısı ihtiyacına göre çalışmış olup, mahallerde ihtiyaç olmadığında sistem kendini durdurmuştur. Deneyden Toprak ve Beton hatlarına ait debi, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları PLC yardımıyla elde edilmiştir. Yatayda ve dikeydeki toprak ve beton sıcaklıklarının değişimi 34972A veri kaydedicisi yardımıyla elde edilmiştir. Toprak ve Beton hatlarına ait deney şartları, MATLAB'ta geliştirilen modele girdi parametresi olarak verilmiş olup aşağıda ayrı ayrı irdelenmiştir.

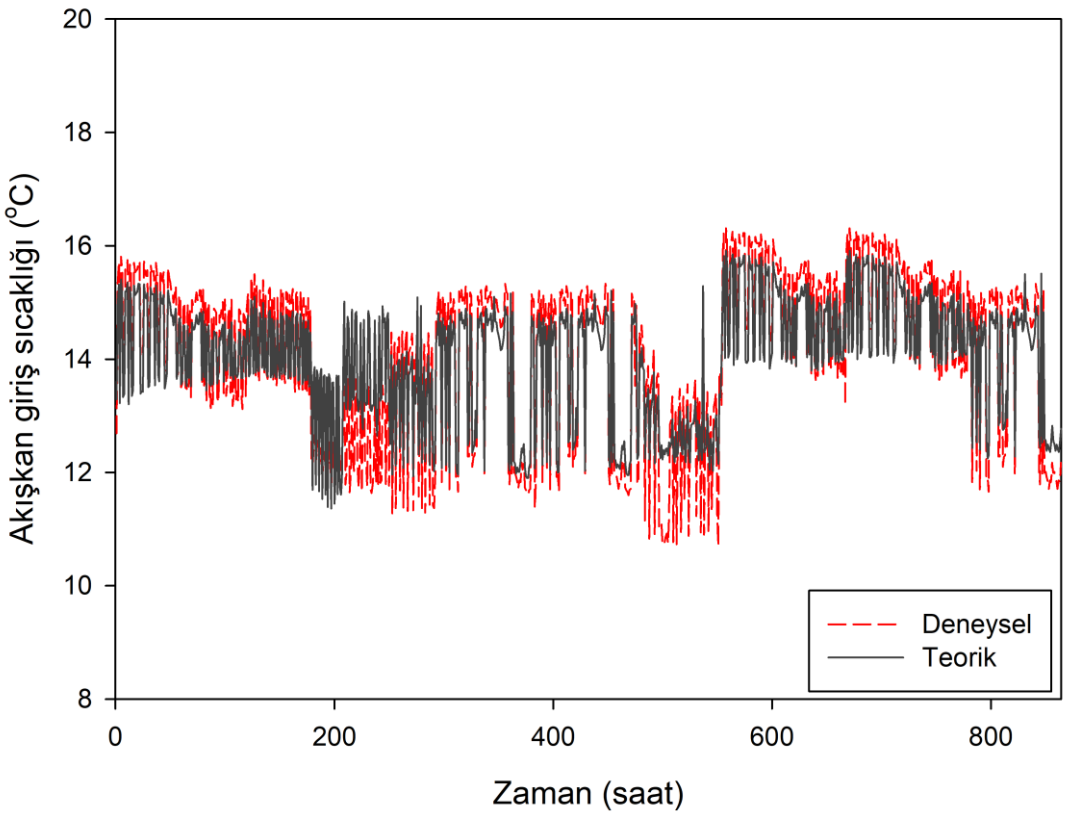
5.5.1 Toprak hattı uygulaması

Toprak hattına ait deney şartları aşağıda verilmiştir ve bu değerler geliştirilen modelde kullanılmıştır.

k_t =1.7 W/m K
k_b =2.3 W/m K
α_t = 0.000001037 m^2/s
α_b = 0.000001403 m^2/s

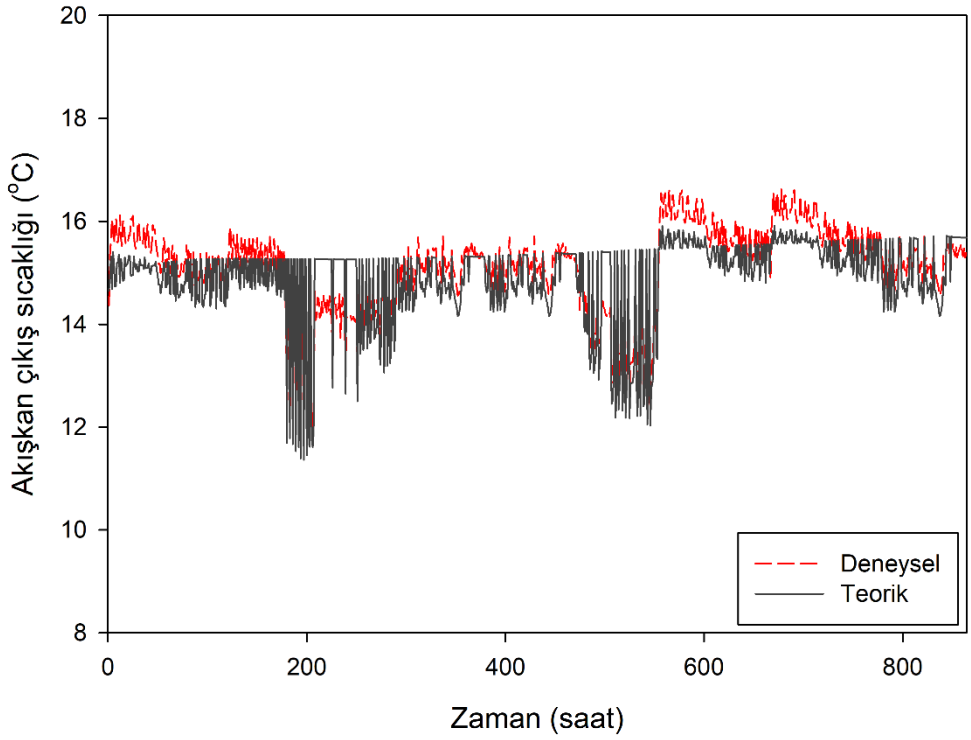
Su, ρ=1000 kg/m^3, C_p=4180 J/kg K
Boru malzemesi =PPRC, k_p = 0.55 W/m K
L = 90 m, d_o/d_i = 32/26 mm
NPT=10
P_s=0.5 m
H=20 m
Y=1.5 m
Yc=1.35 m
Başlangıç zamanı=8 Şubat 2018 saat 11:00
Δx = Δy = 0.05 m , Δz = 1 m (ızgara boyutları), Δt=1800 s (zaman adımı)

Deneysel ve simülasyon çalışmaları neticesinde, deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklığının saatlik değişimi Şekil 5.45'de verilmiştir. Mahallin ısı ihtiyacına göre akışkan giriş sıcaklığı değişmektedir. Bazı zaman aralıklarında ise mahallin ısı ihtiyacı olmadığından sistem çalışmamaktadır. Ölçülen ve hesaplanan saatlik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 12,62 olurken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 8,36 elde edilmiştir (Şekil 5.45 ve Şekil 5.47).

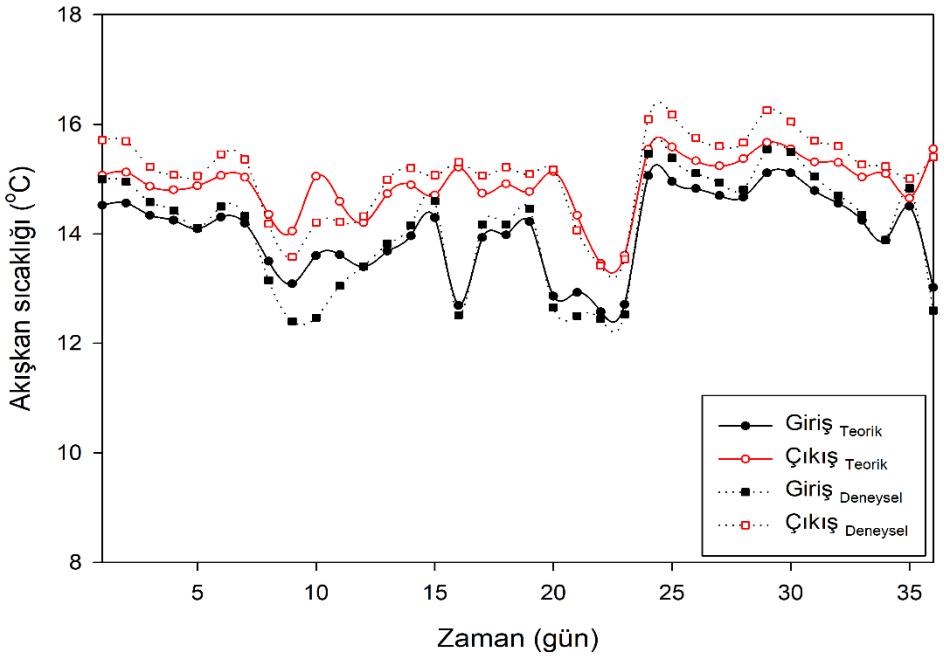


Şekil 5. 45 Deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

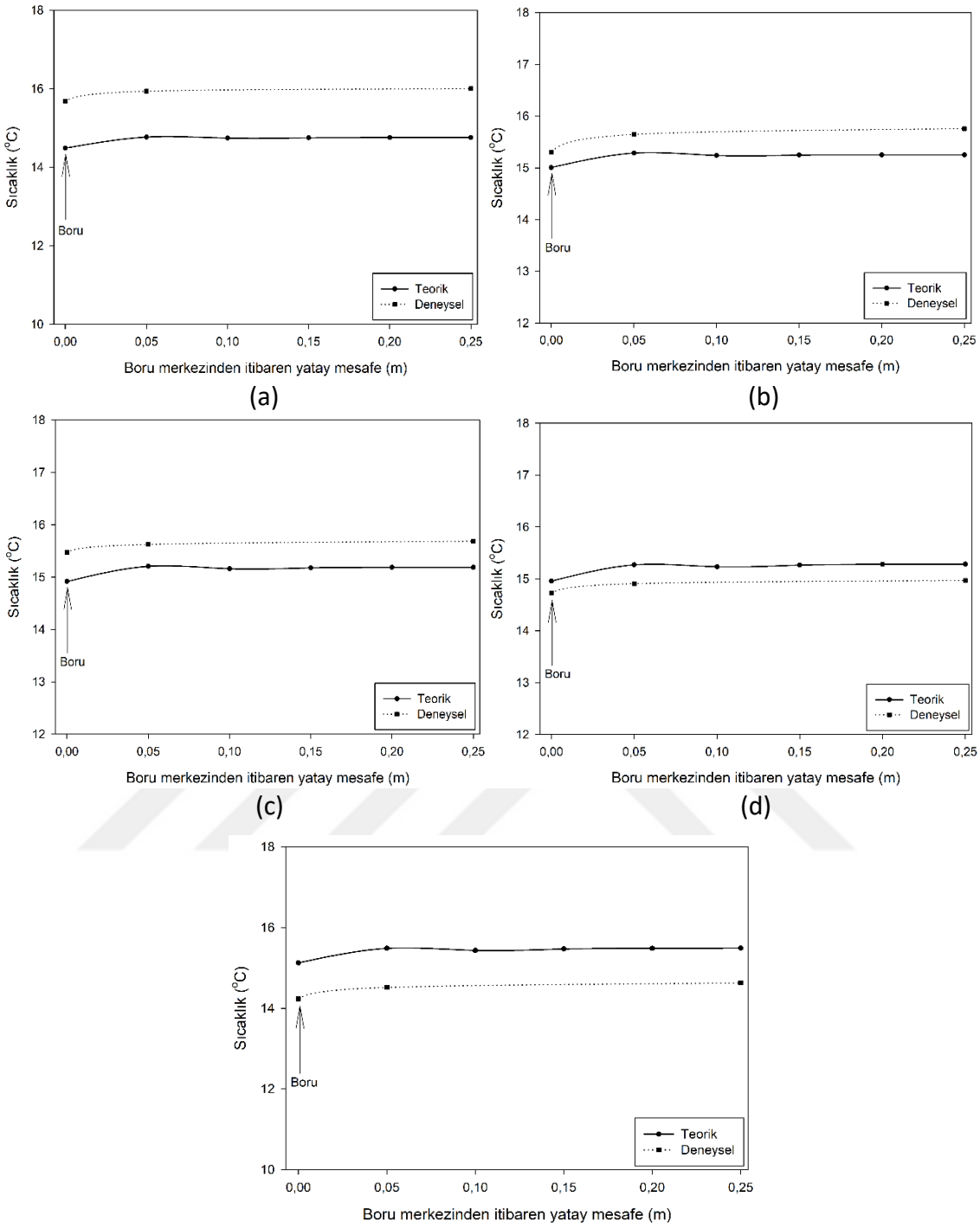
Şekil 5.46'da deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının saatlik değişimi verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan saatlik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 9,98 olurken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 5,58 elde edilmiştir (Şekil 5.46 ve Şekil 5.47).



Şekil 5. 46 Deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

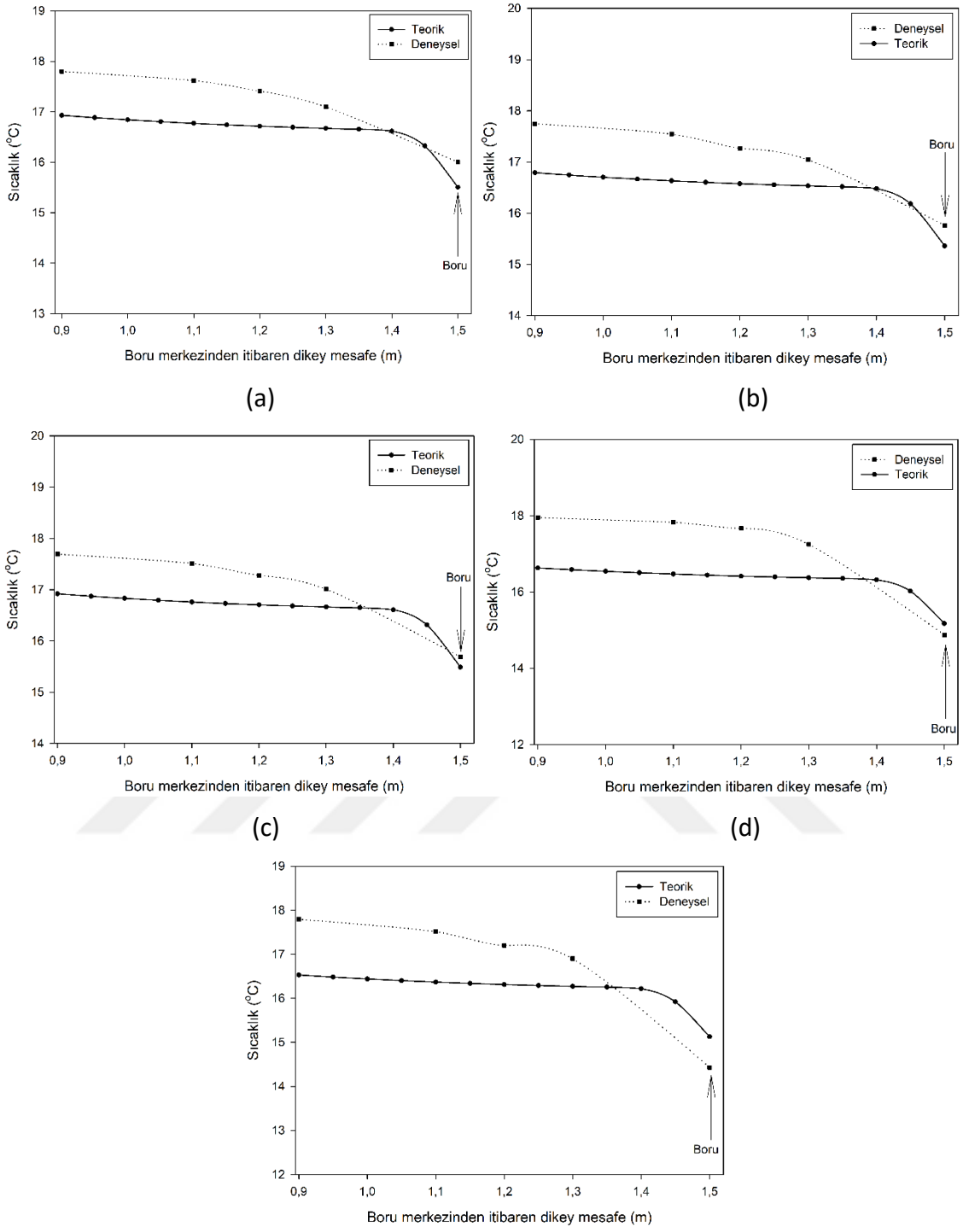


Şekil 5. 47 Deneysel ve teorik akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri



Şekil 5. 48 Yatay eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı

Şekil 5.48a, 5.48b, 5.48c, 5.48d, 5.48e'de boru merkezinden itibaren yatay eksende başlangıç zamanından sırasıyla 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Borular arası mesafe 0.5 m ve simetri özelliğinden dolayı Şekil 5.48'de, 0 (boru merkezi) ile 0.25 m arasında çizilmiştir.



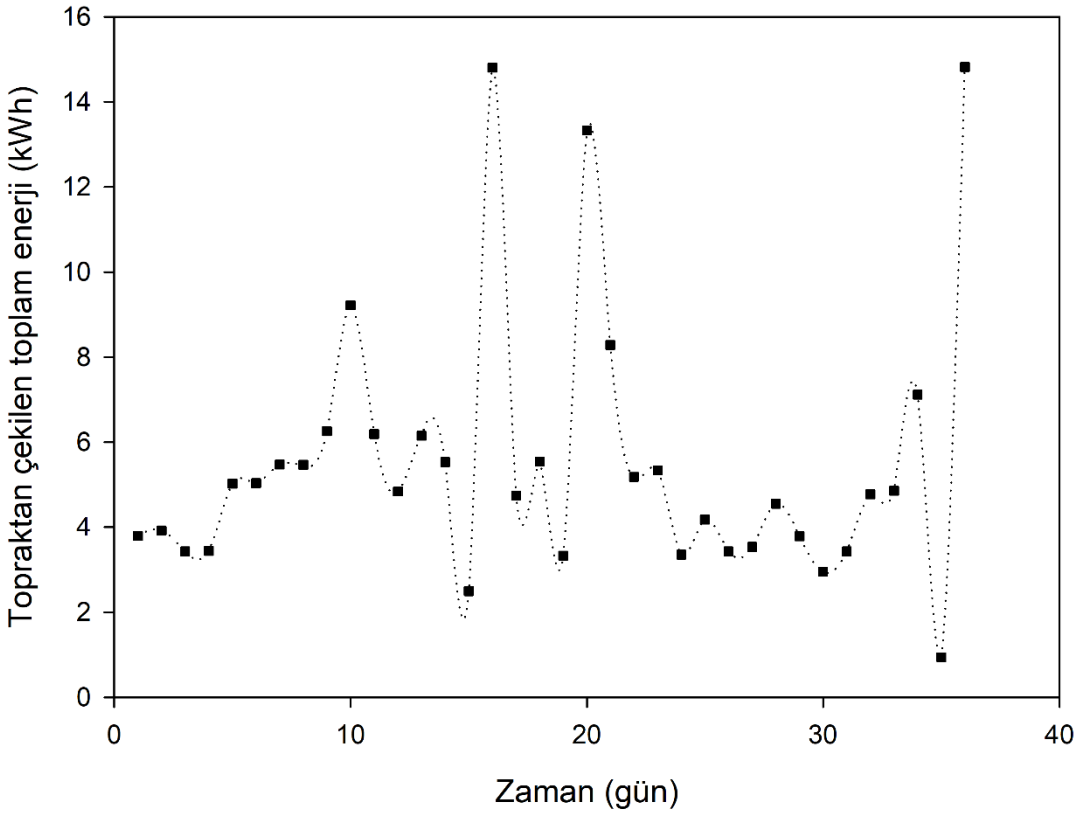
Şekil 5. 49 Düşey eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı

Geliştirilen modelle elde dilen teorik sıcaklıkların yanında, 34972A veri kaydedicisine entegre edilen ısıl çiftlerle de deneysel ölçümler alınmıştır. x=0.15 m'ye yerleştirilen ısıl çift (Şekil 5.16'da **3.** ısıl çift), inşaatın inşası aşamasında zarar gördüğünden dolayı ölçüm

alınamamıştır. Topraktan ısı çekildiğinden dolayı boru merkezinde sıcaklık en düşük olurken, boru merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık artmaktadır. Deneysel ve teorik olarak yatay eksende elde edilen sıcaklık dağılımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

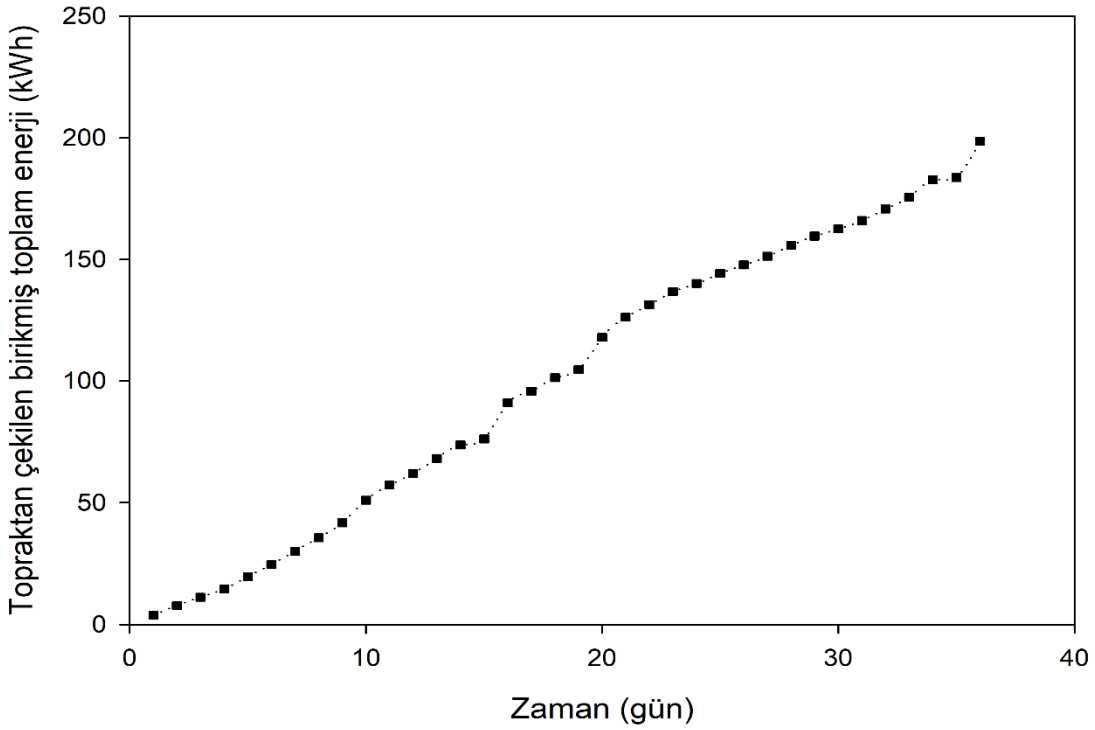
Şekil 5.49a, 5.49b, 5.49c, 5.49d, 5.49e'de boru merkezinden itibaren dikey eksende başlangıç zamanından sırasıyla 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Y=1.5 m'ye gömülen borunun yatay eksende yerleştirilen ısıl çiftlerle beraber dikey eksende radye-temelin içine ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Y=1 m'ye yerleştirilen ısıl çift (Şekil 5.16'da **8.** ısıl çift), inşaatın inşası aşamasında zarar gördüğünden dolayı ölçüm alınamamıştır.

Topraktan ısı çekildiğinden dolayı boru merkezinde sıcaklık en düşük olurken, dikey eksende bina zeminine doğru sıcaklık artmaktadır. Y=1.5 m (borunun gömülü olduğu yer) ile 0.9 m (bina zeminine en yakın yerleştirilmiş ısıl çift) arasında deneysel ve teorik olarak sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Dikey eksende elde edilen deneysel ve teorik sıcaklık dağılımları birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 50 Topraktan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi

Şekil 5.50'de topraktan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi verilmiştir. 36 gün boyunca mahallin ısı ihtiyacına göre günlük ortalama topraktan çekilen enerji 5.51 kWh/gün olarak gerçekleşmiştir. Şekil 5.51'de ise 36 gün boyunca topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişiimi görülmektedir. Birikmiş toplam enerji değişiminden de görüleceği üzere topraktan çekilen enerjide zamanla bir azalma söz konusu olmadığı görülmektedir.



Şekil 5. 51 Topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişimi

5.5.2 Beton hattı uygulaması

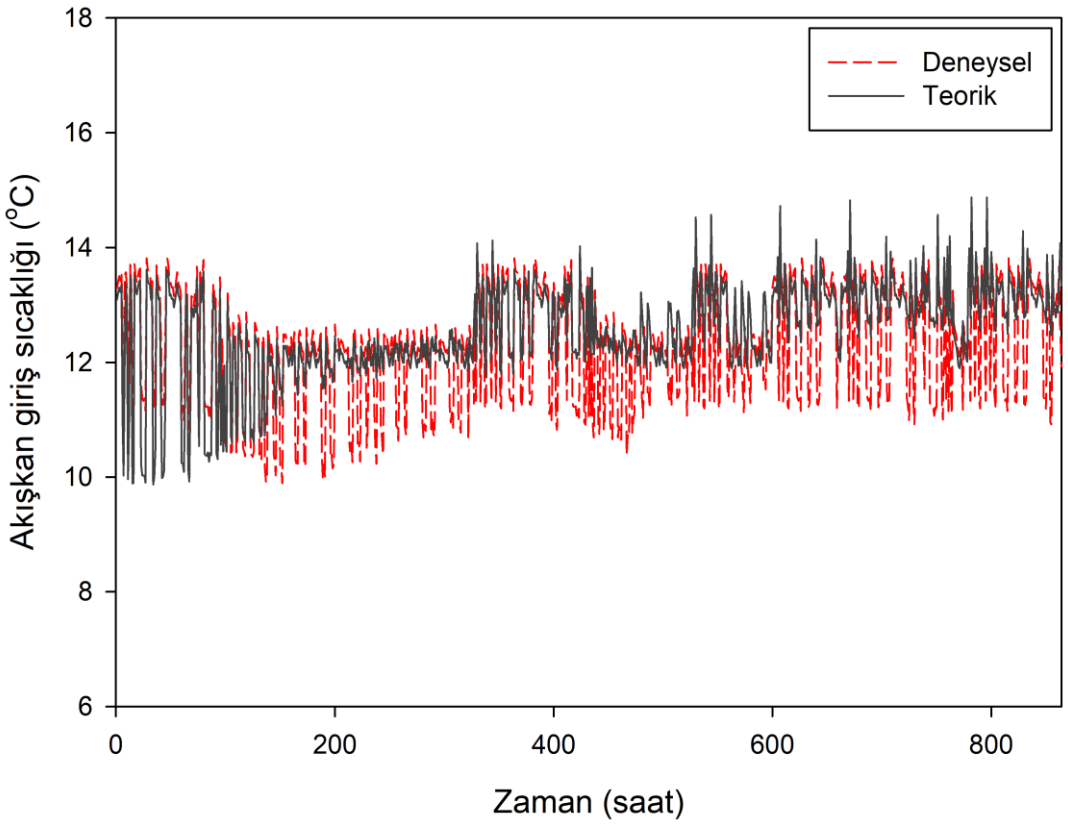
Beton hattına ait deney şartları aşağıda verilmiştir ve bu değerler geliştirilen modelde kullanılmıştır.

k_t =1.7 W/m K
k_b =2.3 W/m K
α_t = 0.000001037 m^2/s
α_b = 0.000001403 m^2/s
Su, ρ=1000 kg/m^3, C_p=4180 J/kg K
Boru malzemesi =PPRC, k_p = 0.55 W/m K
L = 80 m, d_o/d_i = 32/26 mm
NPT=10
P_s=0.5 m

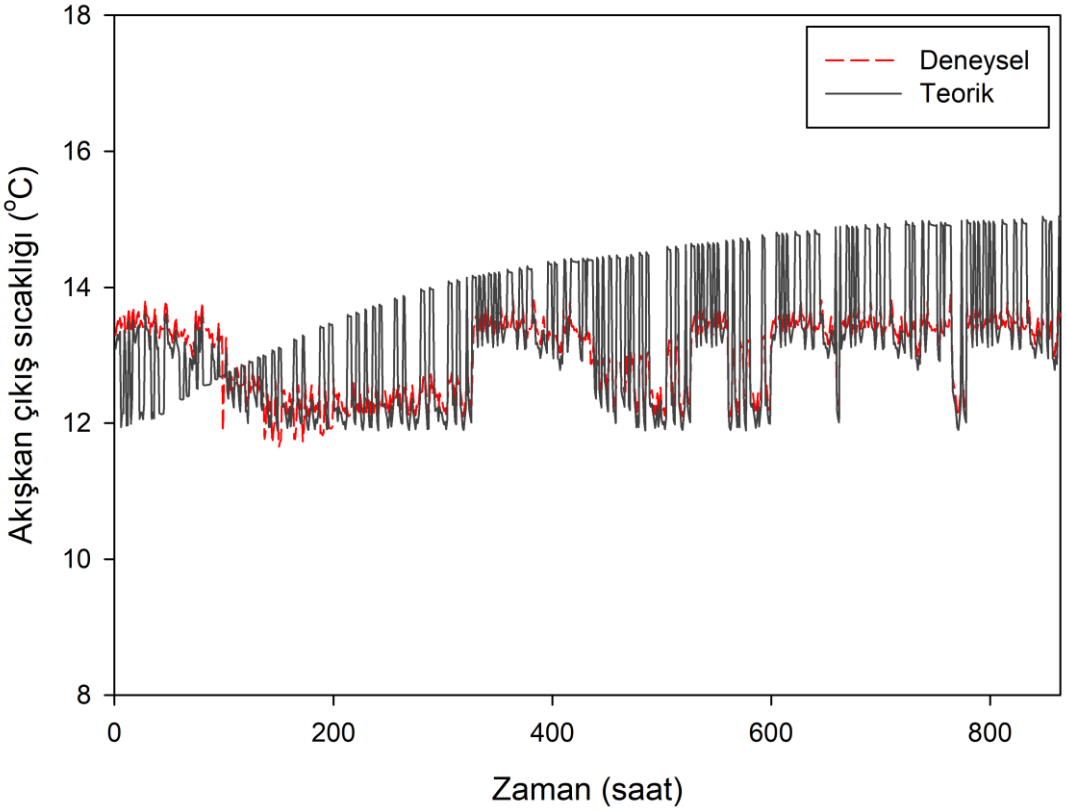
H=20 m
Y=1.1 m
Yc=1.35 m
Başlangıç zamanı=8 Şubat 2018 saat 11:00
Δx = Δy = 0.05 m , Δz = 1 m (ızgara boyutları), Δt=1800 s (zaman adımı)

Deneysel ve simülasyon çalışmaları neticesinde, deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklığının saatlik değişimi Şekil 5.52'de verilmiştir. Mahallin ısı ihtiyacına göre akışkan giriş sıcaklığı değişmektedir. Bazı zaman aralıklarında ise mahallin ısı ihtiyaç olmadığından sistem çalışmamaktadır. Ölçülen ve hesaplanan saatlik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 13,66 olurken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 7,14 elde edilmiştir (Şekil 5.52 ve Şekil 5.54).

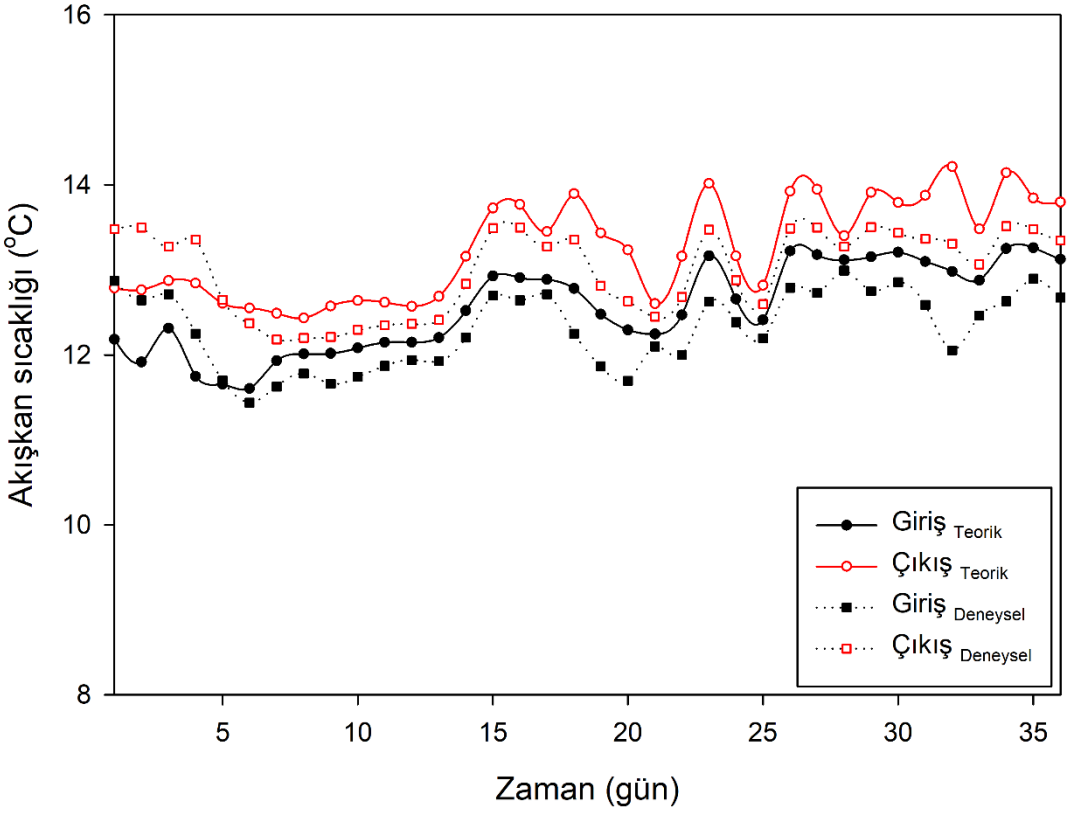
Şekil 5.53'de deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının saatlik değişimi verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan saatlik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 12,77 olurken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark % 6,38 elde edilmiştir (Şekil 5.53 ve Şekil 5.54).



Şekil 5. 52 Deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

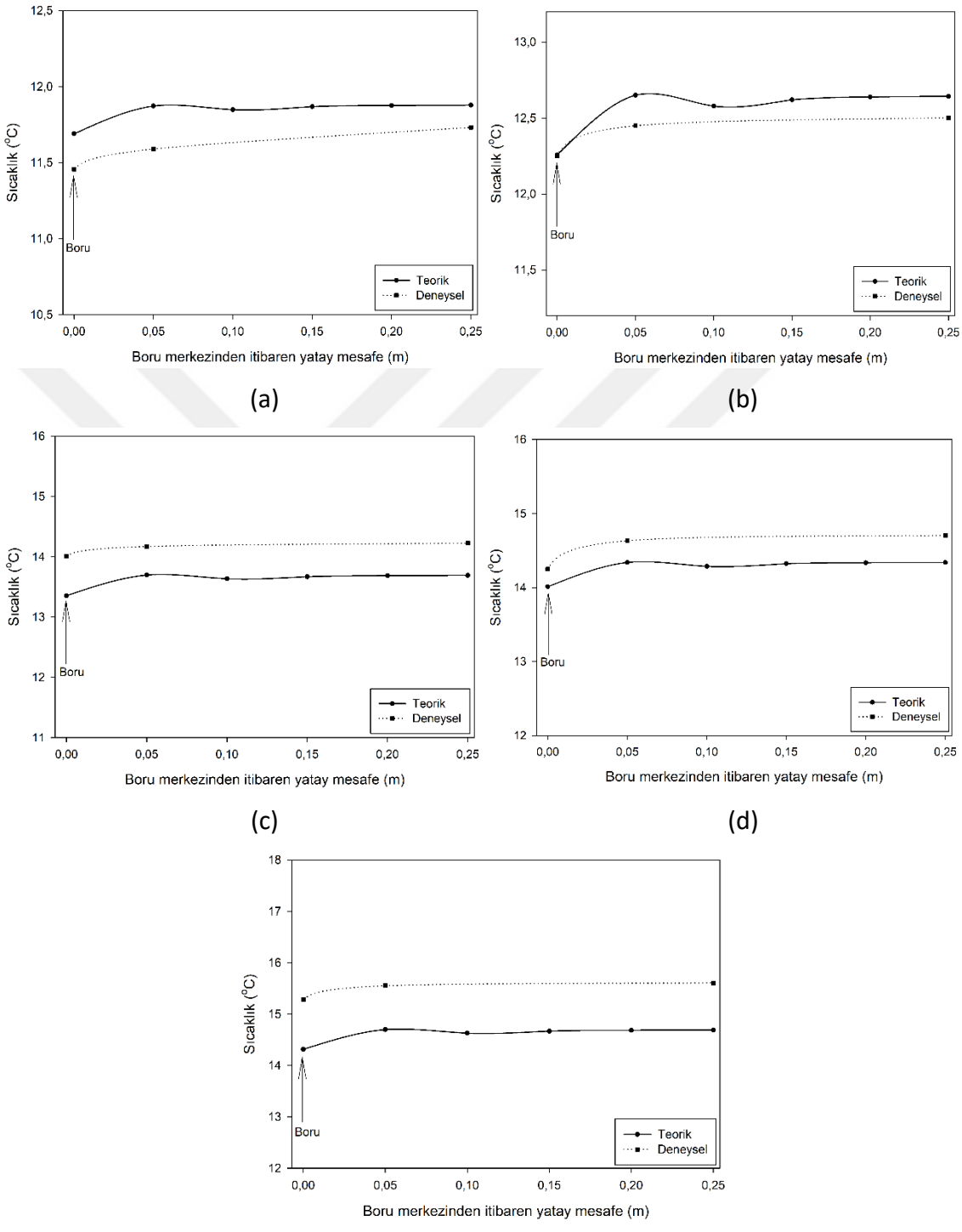


Şekil 5. 53 Deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

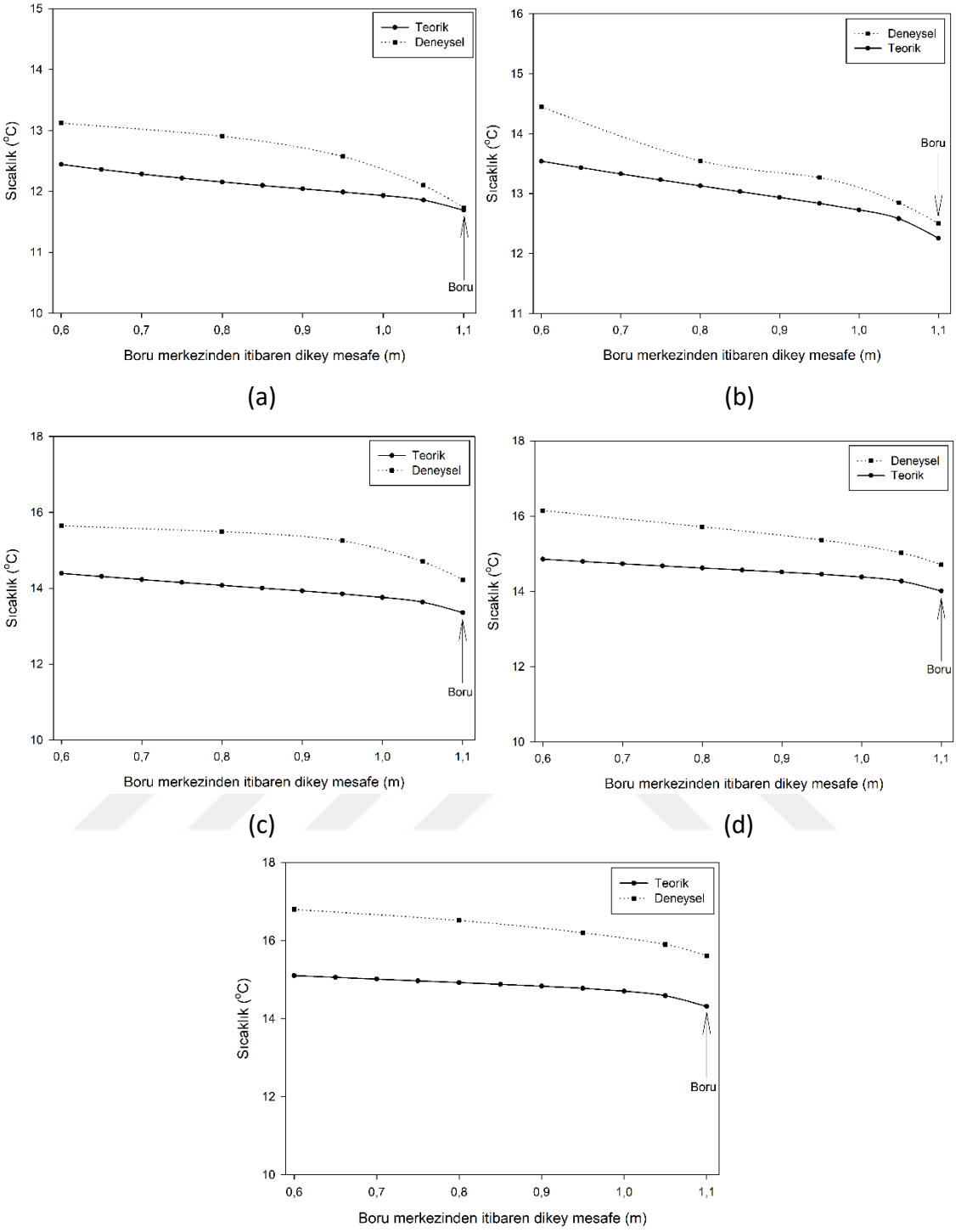


Şekil 5. 54 Deneysel ve teorik akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

Şekil 5.55a, 5.55b, 5.55c, 5.55d, 5.55e'de boru merkezinden itibaren yatay eksende başlangıç zamanından sırasıyla 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 5. 55 Yatay eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı



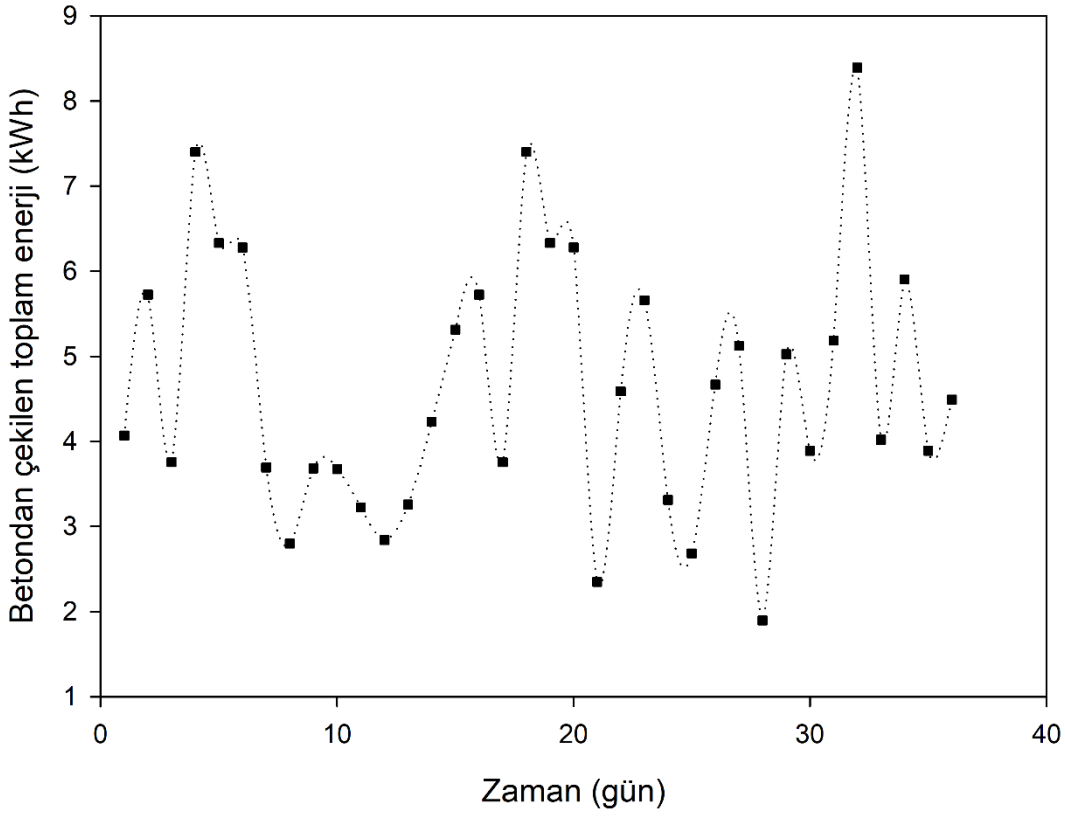
Şekil 5. 56 Düşey eksende (a) 10 saat, (b) 100 saat, (c) 250 saat, (d) 500 saat, (e) 864 saat sonraki sıcaklık dağılımı

Borular arası mesafe 0.5 m ve simetri özelliğinden dolayı Şekil 5.55'de, 0 (boru merkezi) ile 0.25 m arasında çizilmiştir. Geliştirilen modelle elde dilen teorik sıcaklıkların yanında, 34972A veri kaydedicisine entegre edilen ısıl çiftlerle de deneysel ölçümler alınmıştır.

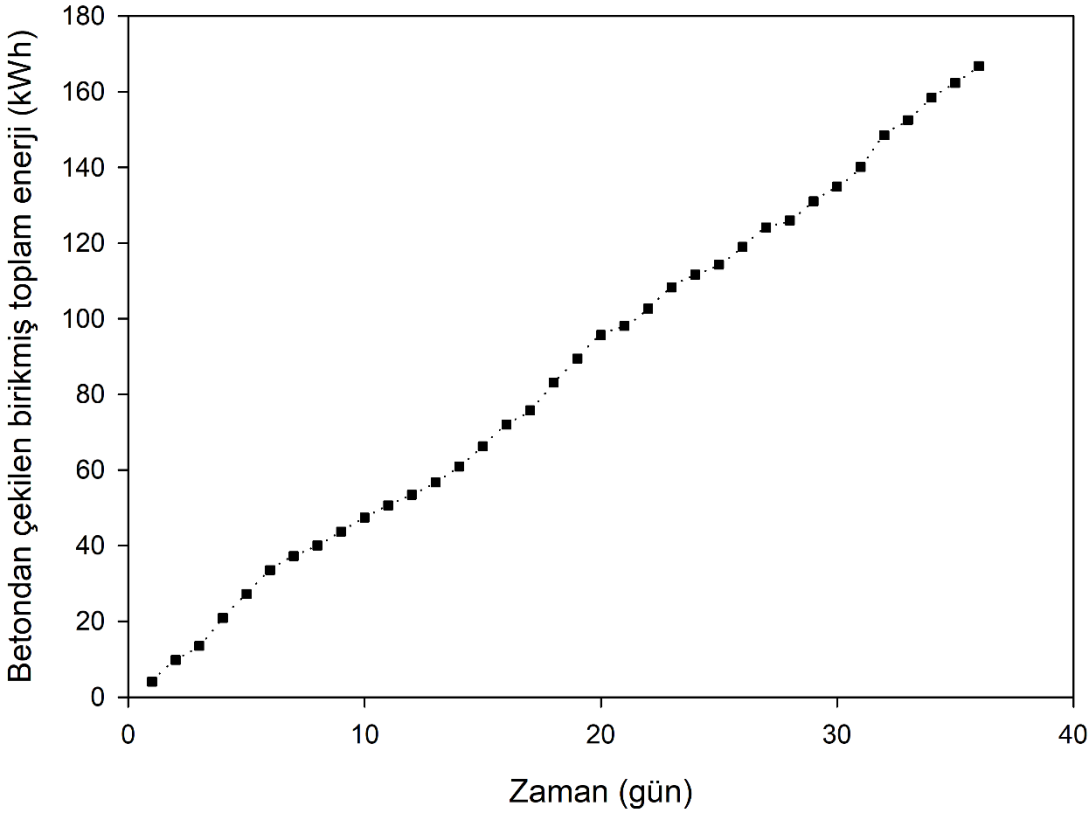
x=0.15 m'ye yerleştirilen ısıl çift (Şekil 5.17'de **3.** ısıl çift), inşaatın inşası aşamasında zarar gördüğünden dolayı ölçüm alınamamıştır. Topraktan ısı çekildiğinden dolayı boru merkezinde sıcaklık en düşük olurken, boru merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık artmaktadır. Deneysel ve teorik olarak yatay eksende elde edilen sıcaklık dağılımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 5.56a, 5.56b, 5.56c, 5.56d, 5.56e'de boru merkezinden itibaren dikey eksende başlangıç zamanından sırasıyla 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Y=1.10 m'ye gömülen borunun yatay eksende yerleştirilen ısıl çiftlerle beraber dikey eksende radye-temelin içine ısıl çiftler yerleştirilmiştir.

Temel betonundan ısı çekildiğinden dolayı boru merkezinde sıcaklık en düşük olurken, dikey eksende bina zeminine doğru sıcaklık artmaktadır. Y=1.10 m (borunun gömülü olduğu yer) ile 0.6 m (bina zeminine en yakın yerleştirilmiş ısıl çift) arasında deneysel ve teorik olarak sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Dikey eksende elde edilen deneysel ve teorik sıcaklık dağılımları birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 57 Temel betonundan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi



Şekil 5. 58 Temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişimi

Şekil 5.57'de temel betonundan çekilen günlük toplam enerjinin değişimi verilmiştir. 36 gün boyunca mahallin ısı ihtiyacına göre günlük ortalama temel betonundan çekilen enerji 4.63 kWh/gün olarak gerçekleşmiştir. Şekil 5.58'de ise 36 gün boyunca temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjinin değişimi görülmektedir. Birikmiş toplam enerji değişiminden de görüleceği üzere çekilen ısı miktarında zamanla bir azalma söz konusu olmadığı görülmektedir.

5.5.3 Toprak ve beton hatlarından elde edilen sonuçlar

8 Şubat-13 Mart tarihleri arasında Toprak ve Beton hatları için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 864 saatlik süre zarfında eşdeğer alana sahip iki mahallin ısı ihtiyacı Toprak ve Beton hatları ile sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda bu hatlara ait debi, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları PLC yardımıyla ölçülürken, yatayda ve dikeydeki toprak ve beton sıcaklıklarının değişimi 34972A veri kaydedicisi yardımıyla ölçülmüştür. Toprak ve Beton hatlarına ait deney şartları, MATLAB'ta geliştirilen modele girdi parametresi olarak verilmiş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve simülasyon çalışmaları neticesinde, Toprak ve Beton hatları için günlük ortalama deneysel ve teorik

akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 8,36 ve % 7,14 elde edilirken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 5,58 ve % 6,38 olarak elde edilmiştir. Toprak ve Beton hatlarının dikey ve yatay eksende başlangıç zamanından sırasıyla 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki toprakta ve temel betonunda deneysel ve teorik sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Günlük ortalama Toprak ve Beton hatlarından çekilen enerji sırasıyla 5.51 ve 4.63 kWh/gün olarak gerçekleşmiş olup, bu hatlara ait birikmiş toplam enerji de elde edilmiştir. Topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin, temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjiden yaklaşık % 15,98 oranında daha iyi sonuçlar vermiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, bir binanın yeteri kadar alana sahip çevresi veya bahçesi olması durumunda, üst yüzeyi atmosfere açık toprağa gömülü Toprak Isı Değiştiricisi (TID)'nin teknik ve ekonomik tasarımı için sayısal bir model geliştirilmiştir. Sayısal çalışmanın ilk aşamasında, ısıtma sezonu için uzun zamanlı periyotta 36 farklı simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının ve toprak sıcaklığının değişimi, 10 yıllık bir süre zarfında elde edilmiştir. Gömme derinliğinin, boru aralıklarının ve yüzey etkilerinin toprak sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [113]:

- Dinamik sınır koşullarını içeren model, üç boyutlu ve zamana bağlı toprak sıcalık dağılımlarını hesaplamak üzere geliştirilmiştir.
- Yüzey etkileri (Güneş ve uzun dalga radyasyonu, konveksiyon ve buharlaşma) geliştirilen modele başarıyla entegre edilmiştir. Yeterli meteorolojik veriler olduğunda kar ve yağmur etkileri de hesaba dahil edilebilir.
- TID'sinin 10 yıllık simülasyonunda meteorolojik toprak ve hava sıcaklıkları, güneş radyasyon verileri ve binanın saatlik ısı yükleri başarıyla kullanılmıştır.
- Topraktan çekilen farklı ısı yükleri için 5 yıllık simülasyonun sonunda sürekli periyodik koşullar elde edilmiştir. TKIP sistemlerinin daha uzun süreler boyunca verimli bir şekilde çalışması için TID'sinin boyutlandırılmasında sürekli periyodik sıcaklık profilinin kullanılması oldukça önemlidir.

- Topraktan 21 W/m (NPT=10, Sim. 1-12) ısı çekildiğinde akışkan giriş sıcaklığı en düşük -13.5^{o}C olurken, topraktan 7 W/m (NPT=30, Sim. 25-36) ısı çekildiğinde akışkan giriş sıcaklığı en düşük 2^{o}C olmaktadır. Akışkan giriş sıcaklığının yüksek olması ısıtma sezonunda TKIP sistemleri için daha uygundur (Sim. 25-36).
- Yüzey ısı akıları arasında en kritik bileşenlerin buharlaşma ve güneş radyasyonu olduğu görülmüştür (Şekil 4.23 ve 4.36).
- Toprak ısı değiştiricisinin kurulumu için gerekli alan dikkate alındığında, 2 m'den daha büyük borular arası mesafelerin toprak sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı aynı zamanda daha büyük alanlara ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. (Şekil 4.24).
- Düşük gömme derinlikleri (Y<1.5 m) için, yüzey koşullarının etkileri daha çabuk görülmüş yani iklim değişikliklerinden daha çok etkilenmiştir. Bu nedenle, 1 m gömme derinliğindeki toprak sıcaklıkları, ısıtma sezonunun sonunda ve ısıtma sezonunun dışında yani yılın geri kalanında mevsimsel yüzey etkilerinden dolayı, 2 m ve 3 m'lik gömme derinliklilerindeki toprak sıcaklıklarına göre daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Şekil 4.25).
- 10 yıllık ısıtma periyodunun sonunda, TKIP sistemi kullanılarak çalıştırılan bir ofisin, topraktaki çözüm alanında Q_{max} = 21 W/m için düşeyde ortalama toprak sıcaklığı ve yatayda boru etrafındaki toprak sıcaklığının yaklaşık olarak sırasıyla 2.5 ^{o}C, 0.7 ^{o}C azaldığı görülmüştür. Birim boru uzunluğu başına topraktan çekilen ısı miktarı artarsa, bu sıcaklıklardaki düşüşün daha fazla olacağı elde edilmiştir (Şekil 4.27-4.28).

Sayısal çalışmanın ikinci aşamasında ise aynı ofisin tüm yıl boyunca uzun zamanlı periyotta üst yüzeyi atmosfere açık toprağa gömülü TID için birçok farklı teknik parametreler dikkate alınarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Paralel boru sayısı (NPT), gömme derinliği, borular arası mesafe, boru çapı, boru boyu ve yüzey üzerindeki ısı akılarının etkileri incelenmiş ve ekonomik parametreler de dahil edilerek bir referans fonksiyon tanımlanmıştır. Yapılan sayısal ve ekonomik analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [5]:

- MATLAB programında geliştirilen kod sayesinde 10 yıllık periyotta saatlik akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıkları elde edilmiştir. MATLAB programında geliştirilen yeni

bir kod yardımıyla hesaplanan akışkan giriş, çıkış ve toprak sıcaklıkları girdi parametresi olarak verilmiş ve saatlik COP değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan COP değerleri ekonomik analizde kullanılmıştır.

- Gömme derinliğinin arttırılmasıyla, toprak sıcaklığı daha kararlı hale gelmekte; yani ısıtma sezonu için en yüksek ve soğutma mevsimi için en düşük olmaktadır. Bunun sonucunda, hem ısıtma hem de soğutma sezonunda daha yüksek COP değerleri elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.37).
- Borular arası mesafe 2 m'den daha fazla olduğunda, toprak sıcaklığında dikkate değer değişiklikler meydana gelmemektedir (Şekil 4.38). Bununla beraber, borular arası mesafe için 1 m'ye kadar referans fonksiyonda keskin bir artış olurken, 1 m'den yüksek değerler için ise referans fonksiyondaki artış oldukça azdır (Şekil 4.42c, 4.43c ve 4.44c).
- Paralel boru sayısı (NPT), gömme derinliği ve boru uzunluğu arttıkça, referans fonksiyon, yüksek kazı maliyetlerinden dolayı azaldığı görülmüştür (Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44).
- Boru iç çapı 26 mm'den küçük olduğunda referans fonksiyon keskin bir şekilde düşmektedir (Şekil 4.37d, 4.38d ve 4.39d). Bunun nedeni, boru çapı azaldığında pompanın güç tüketiminin artmasıdır.
- Elektrik fiyatlarındaki artış oranı, referans fonksiyon üzerinde negatif etkiye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44).
- Yoğuşma sıcaklığı, COP ve referans fonksiyon üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Isıtma için duvar paneli kullanılması, daha düşük çalışma sıcaklığı ve daha yüksek COP değerleri sağladığından dolayı TKIP sistemleri için daha uygun olduğu görülmüştür (Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44).
- Yüksek performansa sahip bir TKIP sistemi tasarlamak için, tüm teknik ve ekonomik parametreleri göz önüne alarak uzun zamanlı bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları neticesinde Paralel boru sayısı (NPT), gömme derinliği, borular arası mesafe, boru çapı ve boru uzunluğu için önerilen değerler sırasıyla 20, 1 m, 1 m, 32 mm ve 40 m'dir.

Sayısal çalışmanın son aşamasında, yeraltı otoparkına sahip bir alışveriş merkezinin temeline ve temelinin altındaki toprağa yerleştirilen ısı değiştirici borularıyla, binanın 10 yıllık periyotta saatlik simülasyonu MATLAB programında geliştirilen kod yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isı değiştirici borularına giren ve çıkan akışkan sıcaklıkları, gömüldüğü yere göre boru etrafındaki toprak ve beton sıcaklıkları elde edilmiştir. Borunun gömüldüğü yerin, farklı paralel boru sayıları ve gömme derinliklerinin toprak ve beton sıcaklıkları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hesaplanan akışkan, toprak ve beton sıcaklıklarına göre MATLAB programında geliştirilen yeni bir kod yardımıyla saatlik COP değerleri ve enerji tüketimleri hesaplanmıştır.

Teknik ve ekonomik parametreler dikkate alınarak bir referans fonksiyon tanımlanmıştır. Yapılan sayısal ve ekonomik analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Hesaplanan akışkan, toprak ve beton sıcaklıklarına göre saatlik COP değerleri hesaplanarak simülasyonlarda ve ekonomik analizlerde kullanılmıştır.
- Isı değiştirici boruları, bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesi durumunda TKIP sistemine ait COP değerleri, bina temeline yerleştirilmesi durumuna göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Şekil 4.49).
- Yüksek NPT değerlerinde (NPT≥50), ısı değiştirici borularını bina temeline (beton) yerleştirmek referans fonksiyon için daha iyi sonuçlar verirken, düşük NPT değerlerinde bina temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesi daha iyi sonuçlar vermiştir (Şekil 4.53). Bunun nedeni, yatay ısı değiştirici borularının bina temeline yerleştirilmesi hafriyat maliyetlerini ortadan kaldırmasıdır. Bu da, yüksek referans fonksiyon değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

Türkiye'de birçok binanın yeteri kadar alana sahip çevresi veya bahçesi olmaması ve kentsel dönüşümle yenilenmekte olduğu dikkate alındığında, bu binaların temellerinin altındaki toprağa ve temeline yatay ısı değiştirici boruları yerleştirilerek ısıtılması ve soğutulması için sayısal bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa kampüsünde yeni inşa edilen Merkez Laboratuvar binasında paralel olarak uygulanan Toprak ve Beton hatlarına ait deneysel çalışmalarla doğrulanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Toprak ve Beton hatları için günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 8,36 ve % 7,14 elde edilirken, günlük ortalama deneysel ve teorik akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum fark sırasıyla % 5,58 ve % 6,38 olarak elde edilmiştir.
- Toprak ve Beton hatlarının düşey ve yatay eksende başlangıç zamanından 10, 100, 250, 500 ve 864 saat sonraki, toprakta ve temel betonunda deneysel ve teorik sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.
- Günlük ortalama Toprak ve Beton hatlarından çekilen enerji sırasıyla 5.51 ve 4.63 kWh/gün olarak gerçekleşmiş olup, bu hatlara ait birikmiş toplam enerji de elde edilmiştir. Topraktan çekilen birikmiş toplam enerjinin, temel betonundan çekilen birikmiş toplam enerjiden yaklaşık % 15,98 oranında daha iyi sonuçlar vermiştir. Geliştirilen sayısal modelde de, ısı değiştirici borularının bina temelinin altındaki toprağa yerleştirildiğinde daha yüksek COP ve F_{ref} değerleri elde edilmiştir. Ancak, bu durum yüksek paralel boru sayılarında (NPT≥50), ısı değiştirici borularını bina temeline (beton) yerleştirmek F_{ref} için daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunun nedeni, yatay ısı değiştirici borularının bina temeline yerleştirilmesi hafriyat maliyetlerini ortadan kaldırarak yüksek F_{ref} değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

TKIP ve TID sistemlerinin sayısal olarak boyutlandırıması ve deneysel olarak uygulanması noktasında şu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- ✓ Geliştirilen modelde kullanılan meteorolojik veriler daha detaylı elde edilerek hesaba dahil edilebilir.
- ✓ Geliştirilen modelin MATLAB programında yazılmış olmasının temel nedeni matris işlemlerindeki kolaylıklardır. Ancak, geliştirilen kod ileride C, C++ gibi programlama dillerine dönüştürülerek daha hızlı çözümler elde edilmesi planlamaktadır.
- ✓ Bina temelinin altındaki toprağa borular yerleştirilirken ek yapılmamalıdır. Eğer yapılması gerekiyorsa iyi kaplin malzemeleri kullanılmalıdır. Ek olarak, boruların üstü kapatılırken boruların zarar görmemesine özen gösterilmelidir.

- ✓ Bina temelinin altındaki toprağa ve bina temeline döşenen boruların kollektör bağlantıları her zaman müdahale edilebilecek şekilde bina dışında ya da çevresinde bir yerde olmalıdır.

Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar neticesinde, farklı iklim bölgelerindeki meteorolojik veriler, şartlandırılacak mahallin özellikleri ve çalışma koşulları belirlendiğinde, TID'nin tasarımı ve boyutlandırılması yapılabilmektedir. MATLAB programında geliştirilen TID ve TKIP simülasyon kodları sayesinde, yatay TID borularının binaların bahçelerine, temeline veya temelinin altındaki toprağa yerleştirilmesi durumunda, tüm geometrik özelliklerin sistemin performansı üzerine etkileri irdelenebilmekte ve bu sayede optimum çalışma şartları elde edilebilmektedir. Gerçekleştirilen teknik analizlerin yanında ekonomik analiz de yapılarak, TKIP için optimizasyon çalışması yapılabilmektedir. Ülkemizde Isıtma ve soğutma yapılacak mahaller için kullanılan fosil yakıtların yerine, TKIP sistemlerinin bina temeline ve bina temelinin altındaki toprağa uygulanmasıyla kazı maliyetlerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması söz konusu olup, bu durum fosil yakıtlar karşısında TKIP sistemlerinin rekabet gücünün ve tüketici farkındalığının artmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Piechowski, M., (1996). A ground coupled heat pump system with energy storage. PhD thesis, University of Melbourne, Australia.

[2] Fischer, S. K. ve Rice, C. K., (1983). "The Oak Ridge heat pump models: I. a steady-state computer design model for air-to-air heat pumps", Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.

[3] Hughes, P. J., (2008). "Geothermal (ground-source) heat pumps: Market status, barriers to adoption, and actions to overcome barriers", Oak Ridge National Laboratory.

[4] Fridleifsson, I.B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J.W., Ragnarsson, A., Rybach, L., Hohmeyer, O., Trittin,T., (2008). "The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change", Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Luebeck, Germany, 59-80.

[5] Kayaci, N. ve Demir, H., (2018). "Long time performance analysis of ground source heat pump for space heating and cooling applications based on thermo-economic optimization criteria", Energy and Build, 163:121-139

[6] Ground-Source Heat Pump Project Analysis, (2006). Minister of Natural Resources, Canada.

[7] Uponor, (2012). "Ground Energy Technical Information", India.

[8] Ingersoll, L.R., Plass H.J., (1948). "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump", Heating, Piping, and Air Conditioning, 20(7):119-122.

[9] Carslaw, H. ve Jaeger, J., (1959). Conduction of Heat in Solids, First Edition, Oxford at the Clarendon Press, London.

[10) Bose, J. E., (1984). "Closed Loop Ground Coupled Heat Pump Design Manual", Engineering Technology Extension, Oklahoma State University, USA.

[11] Cane, R. L. D. ve Forgas, D. A., (1991). "Modeling of Ground Source Heat Pump Performance", ASHRAE Transactions.

[12] Kavanaugh, S.P., (2000). "Field Tests for Ground Thermal Properties – Methods and Impact on Ground-Source Heat Pump Design", ASHRAE Transactions: Symposia, 851-855.

[13] Hart, D. P. ve Couvillion, R., (1986). Earth Coupled Heat Transfer, Publication of the National Water Well Association, Dublin, USA.

[14] Chung, M., Jung, P.S., Rangel, R.H., (1999). "Semi-Analytical Solution for Heat Transfer from a Buried Pipe with Convection on the Exposed Surface", Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 42:3771-3786.

[15] Mukerji, S., Tagavi, K.A., Murphy, W.E., (1997). "Steady-State Heat Transfer Analysis of Arbitrary Coiled Buried Pipes", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 11:182-188.

[16] Hellstrom, G., (1989). "Duct Ground Heat Storage Model: Manual for Computer Code", University of Lund, Sweden.

[17] Hellstrom, G., (1991). "Ground Heat Storage. Thermal Analysis of Duct Storage Systems: Part I Theory", University of Lund, Sweden.

[18] Thornton, J. W., McDowell, T. P., Shonder, J. A., Hughes, P. J., Pahud, D., Hellstrom, G., (1997). "Residential Vertical Geothermal Heat Pump System Models: Calibration to Data", ASHRAE Transactions, 103(2):660-674.

[19] Eskilson, P., (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, PhD Thesis, University of Lund, Lund, Sweden.

[20] Rottmayer, S. P., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., (1997). "Simulation of a Single Vertical U-Tube Ground Heat Exchanger in an Infinite Medium", ASHRAE Transactions, 103(2):651-659.

[21] Mei, V. C. ve Emerson, C.J., (1985). "New Approach for Analysis of Ground-Coil Design for Applied Heat Pump Systems", ASHRAE Transactions, 91(2):1216-1224.

[22] Shonder J.A., Beck, J. V., (1999). "Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using Parameter Estimation Technique", ASHRAE Transactions, 105(2):475-485.

[23] Muraya, N. K., O'Neal D. L., Heffington W. M., (1996). "Thermal Interference of Adjacent Legs in a Vertical U-Tube Heat Exchanger for a Ground-Coupled Heat Pump", ASHRAE Transactions, 102(2):12-21.

[24] Negiz, A., Hastaoğlu, M.A., Heidemann, R.A., (1993). "Three-Dimensional Heat Transfer from a Buried Pipe – I. Laminar Flow", Chemical Eng. Science, 48:3507-3517.

[25] Negiz, A., Hastaoğlu, M.A., Heidemann, R.A., (1995). "Three-Dimensional Transient Heat Transfer from a Buried Pipe: Solidification of a Stationary Fluid", Numerical Heat Transfer, 28:175-193.

[26] Chiasson, A.D., (1999). Advances in Modeling of Ground Source Heat Pump Systems, MSc Thesis, Oklahoma State University, Oklahoma.

[27] Chiasson, A.D., Rees, S.J., Spitler, J.D., (1999). "A Preliminary Assessment of the Effects of Groundwater Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems", ASHRAE Transactions: Research, 106(1):380-393.

[28] Chiasson, A.D., Splitler, J.D., Rees, S.J., Smith, M.D., (2000). “A Model for Simulating the Performance of a Pavement Heating System as a Supplemental Heat Rejecter with Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems”, Journal of Solar Energy Engineering, 122:183-191.

[29] Esen, H., Inalli, M., Esen, M., ve Pihtili, K., (2007c). “Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers”, Building and Environment, 42(10):3606-3615.

[30] Esen, H., Inalli, M., ve Esen, M., (2007a). “Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system”, Building and Environment, 42(3):1126-1134.

[31] Nam, Y., Ooka, R., ve Hwang, S., (2008). “Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system”, Energy and Buildings, 40:2133-2140.

[32] Sanaye, S. ve Niroomand, B., (2010). “Horizontal ground coupled heat pump: Thermal-economic modeling and optimization”, Energy Conversion and Management, 51:2600-2612.

[33] Rezaei, A. B., Kolahdouz, E. M., Dargush, G. F., ve Weber, A.S., (2012). “Ground source heat pump pipe performance with Tire Derived Aggregate”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55:2844-2853.

[34] Demir, H., Koyun, A., ve Temir, G., (2009). “Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification”, Applied Thermal Engineering, 29:224-233.

[35] Florides, G., Theofanous, E., Stylianou, I., Tassou, S., Christodoulides, P., Zomeni, Z., Tsiolakis, E., Kalogirou, S., Messaritis, V., Pouloupatis, P., ve Panayiotou, G., (2013). “Modeling and assessment of the efficiency of horizontal and vertical ground heat exchangers”, Energy, 58:655-663.

[36] Cimmino, M., Bernier, M., ve Adams, F., (2013). “A contribution towards the determination of g-functions using the finite line source”, Applied Thermal Engineering, 51:401-412.

[37] Lamarche, L., (2013). “Short-term behavior of classical analytic solutions for the design of ground-source heat pumps”, Renewable Energy, 57:171-180.

[38] Wang, S., (2014). “Energy modeling of ground source heat pump vs. variable refrigerant flow systems in representative US climate zones”, Energy and Buildings, 72:222-228.

[39] Li, Y., Mao, Y., Geng, S., Han, X., ve Zhang, H., (2014). “Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger”, Geothermics 50:136-147.

[40] Qian, H. ve Wang, Y., (2014). “Modeling the interactions between the performance of ground source heat pumps and soil temperature variations”, Energy for Sustainable Development, 23:115-121.

[41] Robert, F. ve Gosselin, L., (2014). “New methodology to design ground coupled heat pump systems based on total cost minimization”, Applied Thermal Engineering, 62:481-491.

[42] Nam, Y. ve Chae, H.B., (2014). “Numerical simulation for the optimum design of ground source heat pump system using building foundation as horizontal heat exchanger”, Energy, 73:933-942.

[43] Sivasakthivel, T., Murugesan, K., ve Sahoo, P.K., (2014). “Optimization of ground heat exchanger parameters of ground source heat pump system for space heating applications”, Energy, 78:573-586.

[44] Cho, H. ve Choi, J.M., (2014). “The quantitative evaluation of design parameter’s effects on a ground source heat pump system”, Renewable Energy, 65:2-6.

[45] Yanga, W., Suna, L., ve Chena, Y., (2014). “Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers”, Applied Thermal Engineering, 75:259-269.

[46] Kupiec, K., Larwa, B., ve Gwadera, M., (2015). “Heat transfer in horizontal ground heat exchangers”, Applied Thermal Engineering, 75:270-276.

[47] Bojic, M., Cvetkovic, D., ve Bojic, L., (2015). “Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources”, Applied Energy, 138:404-413.

[48] Nowamooz, H., Nikoosokhan, S., Lin, J., ve Chazallon, C., (2015). “Finite difference modeling of heat distribution in multilayer soils with time-spatial hydrothermal properties”, Renewable Energy, 76:7-15.

[49] Hepbaşlı, A., Akdemir, O., ve Hancıoğlu, E., (2003). “Experimental Study of a Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System”, Energy Conversion & Management, 44(4):527-548.

[50] İnallı, M. ve Esen, H., (2004). “Experimental Thermal Performance Evaluation of a Horizontal Ground-Source Heat Pump System”, Applied Thermal Engineering, 24:2219-2232.

[51] Esen H., Inalli M., ve Esen M., (2006). “Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey”, Energy Conversion Management, 47:1281-1297.

[52] Koyun A., Demir H., ve Torun Z., (2014). "Experimental Study of Heat Transfer of Buried Finned Pipe For Ground Source Heat Pump Applications", International Communications In Heat and Mass Transfer, 36:739-743.

[53] Tarnawski, V.R., Leong, W.H., Momose, T., ve Hamada, Y., (2009). “Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan”, Renewable Energy, 34:127-134.

[54] Pulat, E., Coskun, S., Unlu, K., ve Yamankaradeniz, N., (2009). “Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey”, Energy, 34:1284-1295.

[55] Li, S., Yang, W., ve Zhang, X., (2009). “Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system”, Applied Thermal Engineering, 29:3679-3686.

[56] Bakırcı, K., (2010). **“**Evaluation of the performance of a ground-source heat-pump system with series GHE in the cold climate region”, Energy, 35:3088-3096.

[57] Karabacak, R., Acar, S.G., Kumsar, H., Gökgöz, A., Kaya, M., ve Tülek, Y., (2011). “Experimental investigation of the cooling performance of a ground source heat pump system in Denizli, Turkey”, International Journal of Refrigeration, 34: 454-465.

[58] Ozyurt, O. ve Ekinci, D.A., (2011). “Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey”, Applied Energy, 88:1257-1265.

[59] Yu, X., Wang, R.Z., ve Zhai, X.Q., (2011). “Year round experimental study on a constant temperature and humidity air-conditioning system driven by ground source heat pump”, Energy, 36:1309-1318.

[60] Gonzalez, R.G., Verhoef, A., Vidale, P.L., Main, B., Gan, G., ve Wu, Y., (2012). “Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK”, Renewable Energy, 44:141-153.

[61] Naili, N., Attar, I., Hazami, M., ve Farhat, A., (2013). “First in situ operation performance test of ground source heat pump in Tunisia”, Energy Conversion and Management, 75:292-301.

[62] Naili, N., Attar, I., Hazami, M., ve Farhat, A., (2013). “In-field performance analysis of ground source cooling system with horizontal ground heat exchanger in Tunisia”, Energy, 61:319-331.

[63] Shang, Y., Dong, M., ve Li, S., (2014). “Intermittent experimental study of a vertical ground source heat pump system”, Applied Energy, 136:628-635.

[64] Xiong, Z., Fisher, D.E., ve Spitler, J.D., (2015). “Development and validation of a Slinky™ ground heat exchanger model”, Applied Energy, 141:57-69.

[65] Adamovsky, D., Neuberger, P., ve Adamovsky, R., (2015). “Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers – the energy source for heat pumps”, Energy and Buildings, 92:107-115.

[66] Luoa, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., ve Xiang, W., (2015). “Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany”, Geothermics, 53:57-66.

[67] Metz, P. D., (1981). “Design, operation and performance of a ground coupled heat pump system in a cold climate”, IECEC Conference, 1 Jan 1981, Atlanta, GA, USA.

[68] Parker, J. D. ve White, J., (1982). “Comparison of an Air Source and a Ground Source Heat Pump System”, Oklahoma State University, Office of Engineering Continuing Education, Stillwater, OK, USA, 1-6.

[69] Mihalakakou, G., Lewis, J. O. ve Santamouris, M., (1996). “On the heating potential of buried pipes techniques - application in Ireland”, Energy and Buildings, 24(1):19-25.

[70] Leong, W. H., Tamawski, V. R. ve Aittomaki, A., (1998). “Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance”, International Journal of Refrigeration, 21(8):595-606.

[71] Eugster, W. J. ve Rybach, L., (2000). “Sustainable production from borehole heat exchanger systems”, Proceedings World Geothermal Congress, 28 May-10 June 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 825-830.

[72] Ito, S., Takano, Y., Miura, N. ve Uchikawa, Y., (2001). “A heat pump using water and air heat sources arranged in a series”, Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 29 Jul-2 Aug 2001, GA, United States, 471-476.

[73] Popiel, C. O., Wojtkowiaka, J. ve Biemackab, B., (2001). ”Measurements of temperature distribution in ground”, Experimental Thermal and Fluid Science, 25(5):301-309.

[74] Li, Y. C., Chen, G. M., Huang, Y. Y. ve Zhang, L., (2003). “Techno-economic Analysis on Ground-source and Air-source Heat Pump Systems”, International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR), 14-15 April 2003, Hnagzhou, China, 691-700.

[75) Huang, Q. ve Murphy, W. E., (2003). “The Impact of Building Operation on Ground Source Heat Pump Performance and Design”, International Congress of Refrigeration, 17-20 August 2003, Washington, USA.

[76] Romero, G., Urchueguia, J., Witte, H., Cambien, W. ve Magraner, T., (2005). “Comparative study between a geothermal heat pump system and an air-to-water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast”, World Geothermal Congress, 24-29 April 2005, Antalya.

[77] Lindholm, T., Hoflund, R. ve Zhou, Y., (2005). “Design and optimum control of a Swedish dual-source (air and ground) heat pump system”, 8th International Energy Agency Heat Pump Conference, 30 May-2 June 2005, Las Vegas, Nevada.

[78] Dumont, E. ve Frere, M., (2005). “Performance of ground source residential heat pumps”, 8th International Energy Agency Heat Pump Conference, 30 May-2 June 2005, Las Vegas, Nevada.

[79] Karlsson, F. ve Fahlen, P., (2007). ”Capacity-controlled ground source heat pumps in hydronic heating systems”, International Journal of Refrigeration, 30:221-229.

[80] Zogou, O. ve Stamatelos, A., (2008). “Optimization of thermal performance of a building with ground source heat pump system”, Energy Conversion and Management, 48(11):2853-2863.

[81] Omer, A.M., (2008). “Ground-source heat pumps systems and applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(2):344-371.

[82] Lamarche, L., (2009). “A fast algorithm for the hourly simulations of ground-source heat pumps using arbitrary response factors”, Renewable Energy, 34 (10):2252-2258.

[83] Wu Y., Gan G., Verhoef A., Vidale P. L. ve Gonzalez R. G., (2010). “Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers”, Applied Thermal Engineering, 30(16):2574-2583.

[84] Greene, M., Lohan, J., Burke, N., Dimache, L. ve Clarke, R., (2010). “An Efficient Numerical Method for Simulation of Long-term Operation of Horizontal Ground Heat Exchangers with Parallel Shallow Pipes”, Renewable Energy Beyond, 7 - 8 June 2020, Trondheim.

[85] Congedo, P.M., Colangelo, G. ve Starace, G., (2012). “CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: a comparison among different configurations”, Appl. Therm. Eng. , 33:24-32.

[86] Fujii, H., Nishi, K., Komaniwa, Y. ve Chou, N., (2012). “Numerical modeling of Slinky-coil horizontal ground heat exchangers”, Geothermics, 41:55-62.

[87] Xing, L., Cullin, J.R., Spitler, J.D., Im, P. ve Fisher, D.M., (2011). “Foundation heat exchangers for residential ground source heat pump systems—Numerical modeling and experimental validation”, HVAC&R Research, 17(6):1059-1074.

[88] Li H., Nagano K. ve Lai Y., (2012). “A new model and solutions for a spiral heat exchanger and its experimental validation”. Int J Heat Mass Transf, 55:4404–14.

[89] Chong, C.S.A, Gan, G., Verhoef, A., Garcia, R.G. ve Vidale, P.L., (2013). “Simulation of thermal performance of horizontal slinky-loop heat exchangers for ground source heat pumps”, Applied Energy, 104:603-610.

[90] Satsangi, R., Yadav, A. ve Mosahari, P.V., (2012). “Thermodynamic modelling of ground source heat pump for space heating”, Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, 19-20 October 2012, Faridabad, Haryana.

[91] Self, S.J., Reddy, B.V. ve Rosen, M.A., (2013). “Ground source heat pumps for heating: Parametric energy analysis of a vapor compression cycle utilizing an economizer arrangement”, Applied Thermal Engineering, 52:245-254.

[92] Cho, H. ve Choi, J.M., (2014). “The quantitative evaluation of design parameter’s effects on a ground source heat pump system”, Renewable Energy, 65:2-6.

[93] Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T., Ishikami, T. ve Chou, N., (2013). "Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers", Geothermics, 47:61-68.

[94] Alalaimi, M., Lorente, S., Anderson, R. ve Bejan, A., (2013). "Effect of size on ground-coupled heat pump performance", International Journal of Heat and Mass Transfer, 64:115-121.

[95] Simms, R.B., Haslam, S.R. ve Craig, J.R., (2014). "Impact of soil heterogeneity on the functioning of horizontal ground heat exchangers", Geothermics, 50:35-43.

[96] Retkowski, W. ve Thöming, J., (2014). "Thermoeconomic optimization of vertical ground-source heat pump systems through nonlinear integer programming", Applied Energy, 114:492-503.

[97] Wu, W., Wang, B., You, T., Shi, W. ve Li, X., (2013). "A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump", Renewable Energy, 59:39-48.

[98] Kwak, H.Y., You, Y., Oh, S.D. ve Jang, H.N., (2014). "Thermoeconomic analysis of ground-source heat pump systems", Int. J. Energy Res., 38:259-269.

[99] Gan, G., (2013). "Dynamic thermal modelling of horizontal ground-source heat pumps", Int. J. Low-Carbon Technol, 8:95-105.

[100] Choi, J.M., Park, Y.J. ve Kang, S.H., (2014). "Temperature distribution and performance of ground-coupled multi-heat pump systems for a greenhouse, Renewable Energy, 65:49-55.

[101] Ouzzane, M., Nejad, P.M., Aidoun, Z. ve Lamarche, L., (2014). "Analysis of the convective heat exchange effect on the undisturbed ground temperature", Solar Energy, 108:340-347.

[102] Niu, F., Yu, Y., Yu, D. ve Li, H., (2015). "Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies", Applied Thermal Engineering, 77:90-100.

[103] Xiong, Z., Fisher, D.E. ve Spitler, J.D., (2015). "Development and validation of a Slinky™ ground heat exchanger model", Applied Energy, 141:57-69.

[104] Neuberger, P., Adamovský, R. ve Šeďová, M., (2014). "Temperatures and heat flow in a soil enclosing a slinky horizontal heat exchanger", Energies, 7:972-987.

[105] Sebarchievici, C. ve Sarbu, I., (2015). "Performance of an experimental ground-coupled heat pump system for heating, cooling and domestic hot-water operation", Renewable Energy, 76:148-159.

[106] Ouzzane, M., Nejad, P.M., Badache, M. ve Aidoun, Z., (2015). "New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature", Geothermics, 53: 379-384.

[107] Selamat, S. ve Miyara, A., (2015). "The Effect Of Seasonal Variation On Thermal Performance Of Horizontal Slinky-Loop Ground Heat Exchanger", 3rd International High Performance Buildings Conference, 14-17 July 2015, 126-136.

[108] Bottarelli, M., (2013). “A preliminary testing of a flat panel ground heat exchanger”, International Journal of Low-Carbon Technologies, 8:80-87.

[109] Kasuda, T. ve Archenbach, P.R., (1965). “Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States”, ASHRAE Transactions, 71 Part 1.

[110] Ling, F. ve Zhang, T., (2004). “A numerical model for surface energy balance and thermal regime of the active layer and permafrost containing unfrozen water”, Cold Reg. Sci. Technol, 38:1-15.

[111] Mihalakakou, G., (2002). “On estimating soil surface temperature profiles”, Energy and Build. , 34:251-259.

[112] Rosenberg, D.U.V., (1969). Methods for the numerical solution of partial differential equations, First Edition, Publishing Division Gerald L. Farrar & Associates Inc., Tulsa, Oklahoma.

[113] Kayaci N. ve Demir H., (2018). “Numerical modelling of transient soil temperature distribution for horizontal ground heat exchanger of ground source heat pump”, Geothermics, 73:33-47.

[114] Turkish State Meteorological Service, (2011). Section of statistics, Goztepe Station, Istanbul.

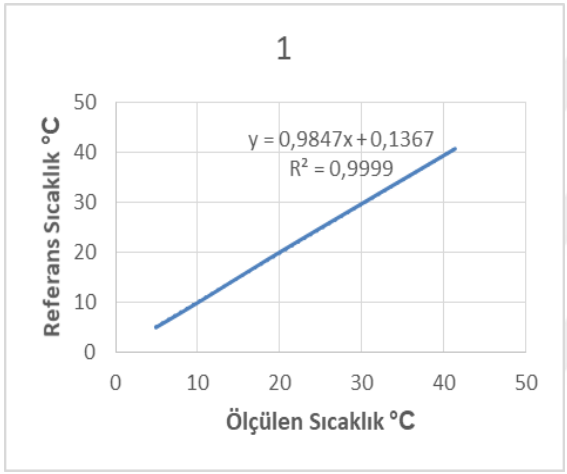
[115] Sullivan, W.G., Wicks, E.M. ve Koelling, C.P., (2008). Engineering Economy, First Edition, Pearson Education, New York.

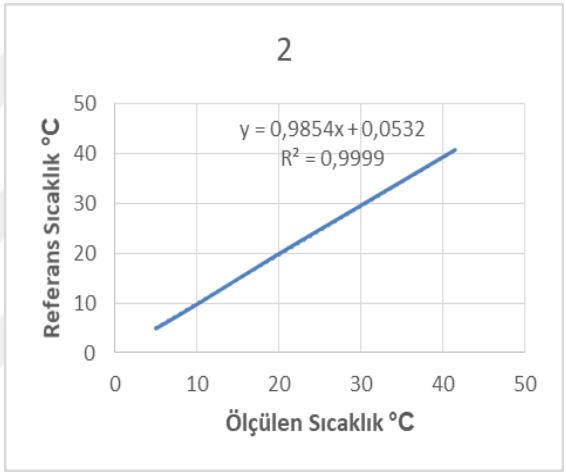
[116] Cengel, Y. A. ve Boles, M. A., (2011). Thermodynamics: An engineering approach, Second Edition, Mc Graw Hill, New York.

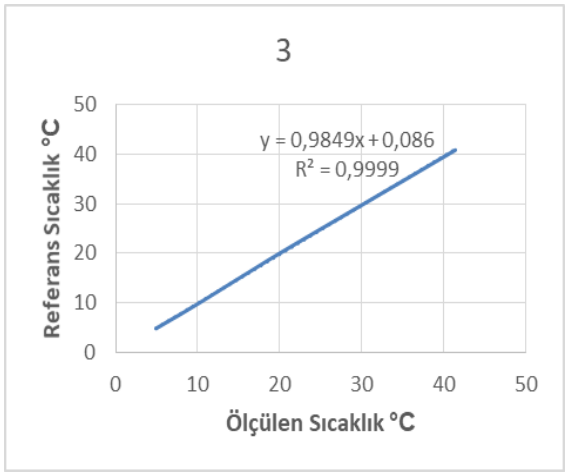
EK-A

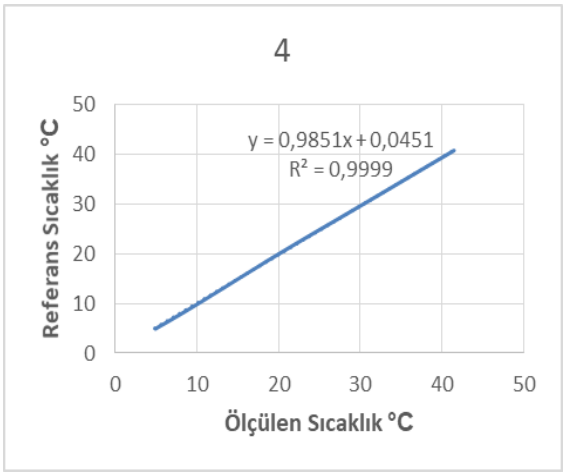
KALİBRASYON GRAFİKLERİ

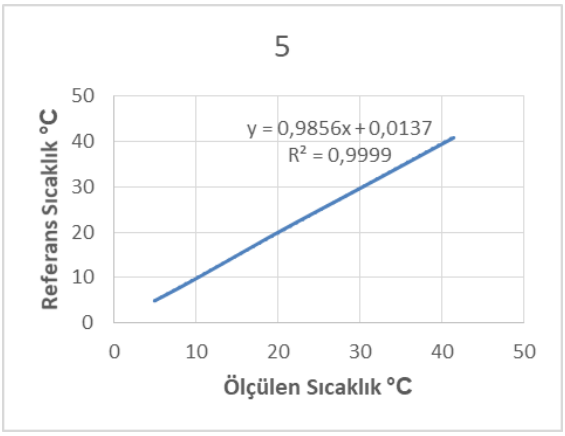
Toprak hattına ait ısıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri

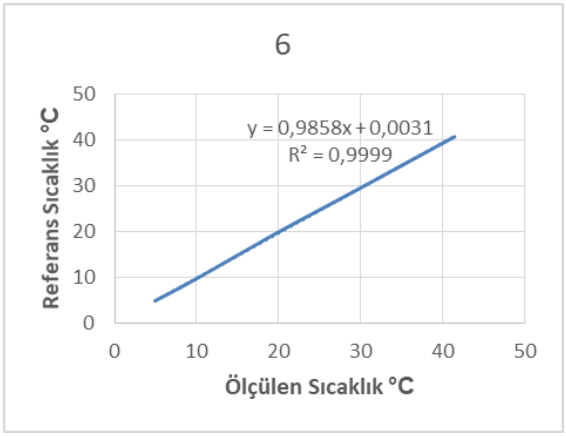


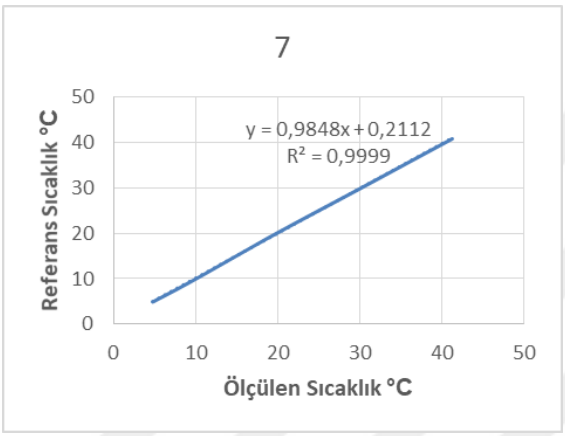


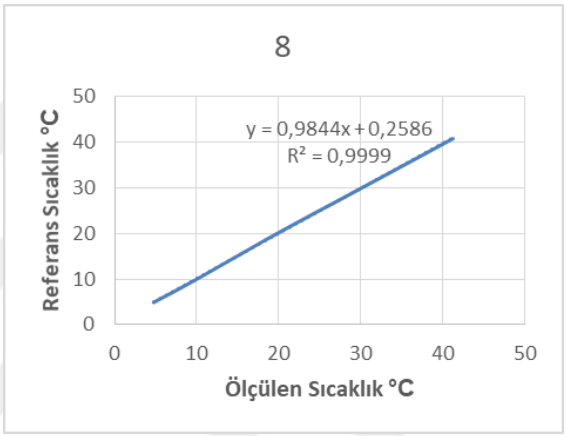


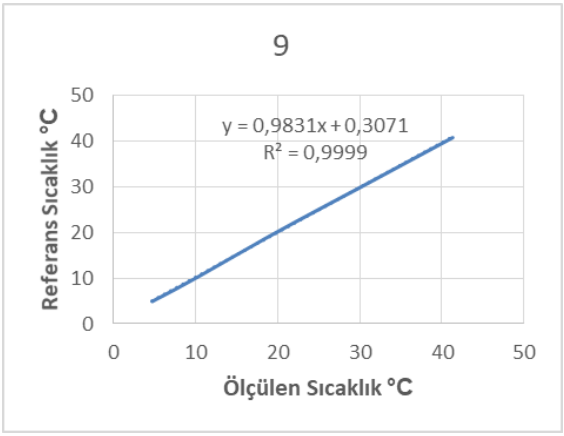



5
y = 0,9856x + 0,0137
R² = 0,9999
Referans Sıcaklık °C
Ölçülen Sıcaklık °C
0
10
20
30
40
50

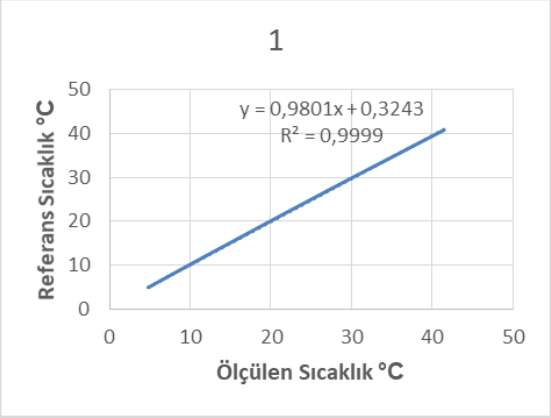

6
y = 0,9858x + 0,0031
R² = 0,9999
Referans Sıcaklık °C
Ölçülen Sıcaklık °C
0
10
20
30
40
50

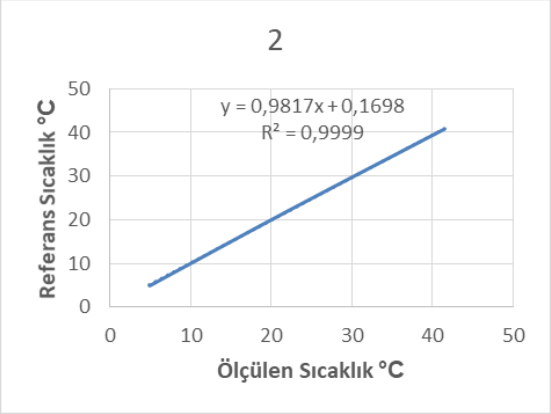

7
y = 0,9848x + 0,2112
R² = 0,9999
Referans Sıcaklık °C
Ölçülen Sıcaklık °C
0
10
20
30
40
50

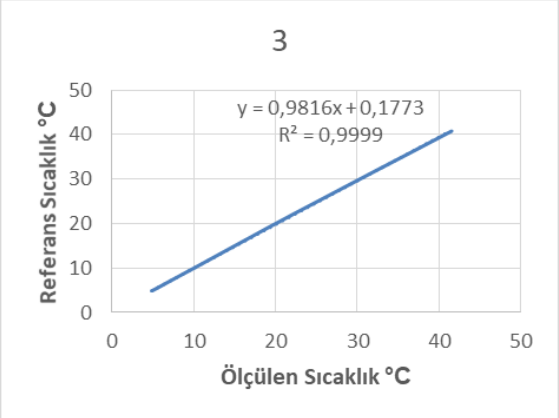

8
y = 0,9844x + 0,2586
R² = 0,9999
Referans Sıcaklık °C
Ölçülen Sıcaklık °C
0
10
20
30
40
50

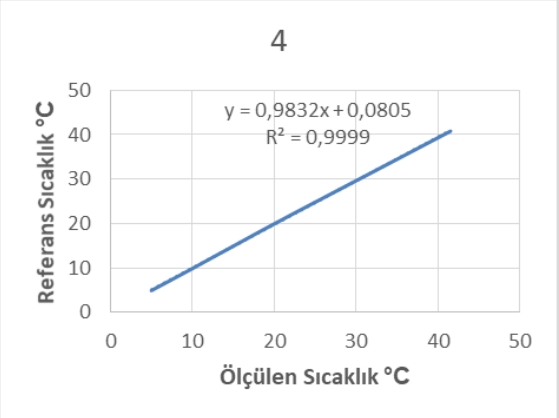

9
y = 0,9831x + 0,3071
R² = 0,9999
Referans Sıcaklık °C
Ölçülen Sıcaklık °C
0
10
20
30
40
50

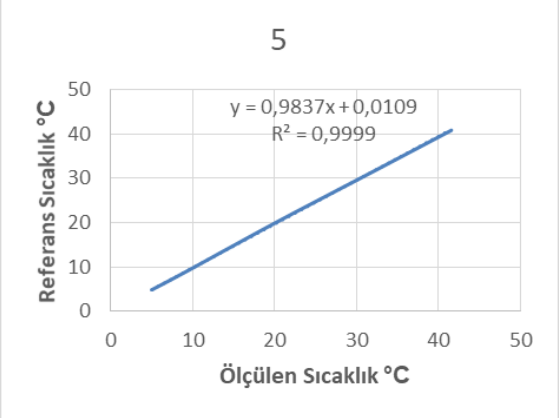
Beton hattına ait ısıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri

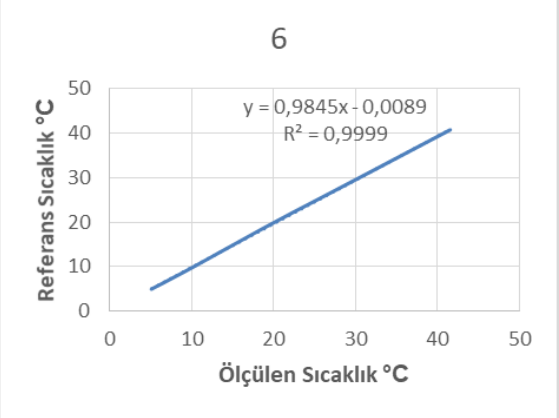


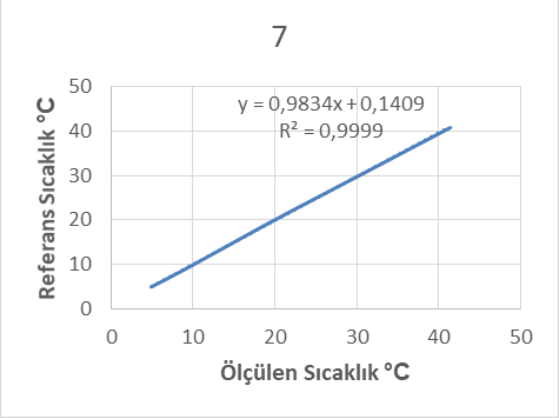


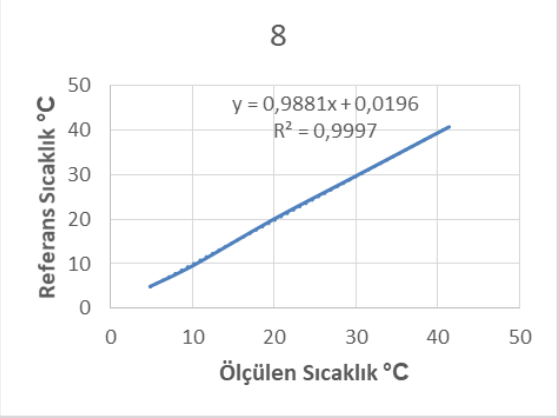












ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nurullah KAYACI

Doğum Tarihi ve Yeri : 07/07/1986 - Kadıköy

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : nurullahkayaci@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. ABD, Isı Proses Prog	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü	Gaziantep Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Nevzat Ayaz Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2018-	Namık Kemal Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2010-2018	Yıldız Teknik Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. **Kayaci, N.** ve Demir, H., (2018). “Long time performance analysis of ground source heat pump for space heating and cooling applications based on thermo-economic optimization criteria”, Energy and Building, 163:121-139.

2. **Kayaci, N.** ve Demir, H., (2018). “Numerical modelling of transient soil temperature distribution for horizontal ground heat exchanger of ground source heat pump”, Geothermics, 73:33-47.

3. Celen A., **Kayaci N**., Demir H., Dalkiliç A.S., Wongwises S., (2014). “Numerical investigation for the calculation of TiO_2-water nanofluids' pressure drop in plain and enhanced pipes”, International Communications In Heat And Mass Transfer, 53:98-108.

4. **Kayaci N**., Balcilar M., Tabatabaei M., Celen A., Yildiz O., Dalkilic A.S., Wongwises S., (2013). “Determination of the Single-Phase Forced Convection Heat Transfer Characteristics of TiO_2 Nanofluids Flowing in Smooth and Micro-Fin Tubes by Means of CFD and ANN Analyses”, Current Nanoscience, 9:61-80.

5. Dalkilic A.S., **Kayaci N**., Celen A., Tabatabaei M., Yildiz O., Daungthongsuk W., Wongwises S., (2012). “Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids - A Review of the Recent Literature”, Current Nanoscience, 8,:949-969.

Bildiri

1. **Kayaci N**., Demir H., Atayilmaz Ö., Ağra Ö., Kanbur, B.B., Acet R. C, Gemici, Z., (2018). “Bina Temeline Ve Altindaki Toprağa Uygulanan Toprak Kaynakli Isi Pompasi Sisteminin Deneysel İncelenmesi”, IV.

Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 18-20 Nisan 2018, Edirne.

2. **Kayaci N**., Demir H., (2018). “Bina Temeline Uygulanan Toprak Kaynakli Isi Pompasi Sisteminin Uzun Zamanli Termo-Ekonomik Optimizasyonu”, IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 18-20 Nisan 2018, Edirne.

3. **Kayaci N**., Demir H., Atayilmaz Ö., Ağra Ö., (2016). “Experimental Setup For The Determination Of Heat Transfer Inside The Soil Region In Ground Source Heat Pump (GSHP)”, 2nd International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering, 13-14 Temmuz 2016, Bangkok.

4. **Kayaci N**., Gönül A., Demir H., Atayilmaz Ş.Ö., Sevindir M.K., (2016). “Numerical Modeling of horizontal ground source heat pump system for snow melting on pavements”, 2nd International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering, 13-14 Temmuz 2016, Bangkok.

5. Sevindir M.K., Demir H., Atayilmaz Ş.Ö., **Kayaci N**., Gönül A., (2016). “The Economic Comparision Of Seawater Source Heat Pump Application And Electric Heating On Bridge Heating In Winter”, 2nd International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering, 13-14 Temmuz 2016, Bangkok.

6. **Kayaci N**., Dalkiliç A.S., Malazi M.T., Wongwises S., (2015). “Numerical investigation of the single phase forced convection heat transfer characteristics of Nanofluid flowing in circular and noncircular tubes”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 Kasım 2015, Houston.

7. **Kayaci N**., Demir H., Atayilmaz Ö., Ağra Ö., (2015). “Long-term Simulatıon Of Horizontal Ground Heat Exchanger For Ground Source

Heat Pump", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 Kasım 2015, Houston.

8. **Kayaci N**., Demir H., Atayilmaz Ö., Ağra Ö., (2015). "Effects Of Surface Conditions For Different Climatic Zones In Turkey On Temperature Distribution In The Soil", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 Kasım 2015, Houston.

9. Kayki O., **Kayaci N**., Özbeyaz K., (2015)."Design And Numerical Analysis Of A Vehicle Armour Agains Bullets And Shaped Charges", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 Kasım 2015, Houston.

10. Demir H., **Kayaci N**., Gönül A., Atayilmaz Ş.Ö., Ağra Ö., (2014). "Thermo-Economical Optimization of Ground Source Heat Pump With Horizontal Ground Heat Exchangers for a Heating Season in Istanbul: A Case Study", ASME Proceedings 21st Symposium on Industrial and Environmental Applications of Fluid Mechanics, 3-7 Ağustos 2014**,** Illinois.

11. Gönül A., Ağra Ö., Sevindir M.K., Atayilmaz Ş.Ö., Demir H., **Kayaci N**., (2014). "Drying Kinetics Of Kiwi Fruits", 19th International Drying Symposium, 24-27 Ağustos 2014, Lyon.

12. Dalkiliç A.S., Celen A., Atayilmaz Ö., **Kayaci N**., Wongwises S., (2014). "Smoke control of a car park by means of cfd analyses using jet fans", ASME Proceedings 21st Symposium on Industrial and Environmental Applications of Fluid Mechanics, 3-7 Ağustos 2014**,** Illinois.

13. Balcilar M., Dalkiliç A.S., **Kayaci N**., Celen A., Wongwises S., (2012). "Critical review on the determination of physical properties of nanofluids for the convective heat transfer in tubes", 3rd TSME

International Conference on Mechanical Engineering, 24-26 Ekim 2012, Bangkok.

14. **Kayaci N.**, Celen A., Dalkiliç A.S., Tabatabaei M., Yildiz O., Wongwises S., (2012). "Numerical investigation of the single phase forced convection heat transfer characteristics of nanofluid flowing in smooth and micro-fin tubes", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 9-15 Kasım 2012**,** Houston.

15. Celen A., **Kayaci N**., Dalkiliç A.S., Wongwises S., (2012). "Effect of the heat recovery system to the performance of air handling unit of a hospital", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 9-15 Kasım 2012**,** Houston.

16. Celen A., **Kayaci N**., Dalkılıç A.S., Wongwises S., (2012). "A yacht-type chiller design", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 9-15 Kasım 2012**,** Houston.

Proje

1. Toprak ve Donatılı Bina Temeli Kaynaklı Isı Pompalarında Kaynak Isı Değiştiricisi Performansının İyileştirilmesi İçin Yeni Bir Uygulama Yönteminin Geliştirilmesi / Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı **(0472.STZ.2013-2)**

ÖDÜLLERİ

1. **Kayaci N**., Demir H., Atayilmaz Ö., Ağra Ö., (2016). "Experimental Setup For The Determination Of Heat Transfer Inside The Soil Region In Ground Source Heat Pump (GSHP)", 2nd International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering, 13-14 Temmuz 2016, Bangkok, **En iyi çalışma ödülü (Best Paper)**.