

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI VE TOPRAK ISI  
DEĞİŞTİRİCİLERİNİN OPTİMİZASYONU VE  
GELİŞTİRİLMESİ**

Makine Yük. Müh. Hakan DEMİR

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 16 Şubat 2006  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Galip TEMİR (YTÜ)  
**Jüri Üyeleri** : Prof. Dr. İsmail TEKE (YTÜ)  
: Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN (YTÜ)  
: Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU (İTÜ)  
: Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU (İTÜ)

**İSTANBUL, 2006**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR .....	3
2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Çalışma Şekli ve Elemanları .....	4
2.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi .....	4
2.1.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi Türleri .....	6
2.1.1.1.1 Kapalı Çevrimli Sistemler .....	6
2.1.1.1.2 Açık Çevrimli Sistemler .....	9
2.1.1.1.3 Doğrudan Genleşmeli Sistemler .....	10
2.1.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası .....	11
2.1.3 Dağıtım sistemi .....	13
2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları .....	15
3. TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	17
3.1 Toprak Isı Değiştiricilerinin Tasarımı ve Andırımı İçin Analitik Modeller.....	17
3.1.1 Ingersoll Yaklaşımı.....	17
3.1.2 Hart ve Couvillion Yaklaşımı .....	19
3.1.3 IGSHPA Yaklaşımı .....	22
3.1.4 Kavanaugh Yaklaşımı.....	25
3.1.5 Mukerji, Tagavi, Murphy Yaklaşımı .....	28
3.1.6 Chung, Jung, Rangel Modeli .....	29
3.2 Toprak Isı Değiştiricilerinin Tasarımı ve Andırımı İçin Sayısal Modeller .....	31
3.2.1 Eskilson Modeli .....	31
3.2.2 Hellstrom Modeli.....	31
3.2.3 Thornton vd.'nin Hellstrom Modeli Uygulaması .....	32
3.2.4 Mei ve Emerson Modeli .....	32
3.2.5 Muraya Modeli .....	33
3.2.6 Rottmayer, Beckman ve Mitchell Modeli .....	33
3.2.7 Shonder ve Beck Modeli .....	33
3.2.8 Chiasson, Spitler, Rees, Smith Modeli .....	34

3.2.9	Piechowski Modeli .....	38
3.2.10	Negiz, Hastaoğlu, Heidemann Modeli .....	43
3.3	Mevcut Modellerin Karşılaştırılması ve Yeni Model.....	46
4.	PARALEL BORULU YATAY TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ MODELİ .....	48
4.1	Problemin Tanımı .....	50
4.1.1	Toprak Sıcaklığının Zamana ve Derinliğe Bağlı Olarak Hesaplanması.....	52
4.1.2	Yüzeydeki Enerji Dengesi .....	55
4.1.2.1	Toprak Üst Yüzeyinde Taşınımın Olan Duyulur Isı Geçişi.....	56
4.1.2.2	Yüzeyden Buharlaştırma Nedeniyle Oluşan Gizli Isı .....	57
4.1.2.3	Toprak Üst Yüzeyine Gelen Güneş Işınımı.....	59
4.1.2.4	Gün Uzunluğunun Hesaplanması .....	59
4.1.2.5	Yüzeyden Yayılan Uzun Dalga Işınımı .....	61
4.1.2.6	Yüzeye Gelen Uzun Dalga Işınımı .....	61
4.1.2.7	Yüzeydeki Kar Örtüsünden İletimle Olan Isı Geçişi.....	61
4.1.2.8	Yağış Nedeniyle Oluşan Isı Akısı .....	62
4.1.3	Boru Boyunca Akışkan Sıcaklığının Değişimi.....	62
5.	PROBLEMİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ .....	65
5.1	Çok Boyutlu Zaman Bağlı Isı İletimi .....	65
5.2	İki Boyutlu Zamana Bağlı Isı İletimi ve ADI Yöntemi Uygulaması .....	65
5.3	Thomas Algoritması .....	68
5.4	MATLAB Ortamında Problemin Modellenmesi ve Çözümü .....	69
5.5	Optimum Toprak Isı Değiştiricisi Özelliklerinin Belirlenmesi .....	75
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	80
6.1	Deney Tesisatı .....	80
6.1.1	Toprak Isı Değiştiricisi .....	80
6.1.2	Isı Pompası .....	83
6.1.3	Kontrol ve Ölçüm Sistemi .....	84
6.1.3.1	Kalibrasyon İşlemleri .....	86
6.2	DeneySEL Çalışma Yöntemi .....	87
6.3	Sonuçlar .....	88
6.4	Hata Analizi.....	94
7.	TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ ...	96
7.1	Yatay Borulu Toprak Isı Değiştiricisinin Termoekonomik İncelemesi .....	96
7.1.1	Amaç Fonksiyonu.....	97
7.1.1.1	Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı ( $C_i$ ).....	98
7.1.1.1.1	Pompa Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı.....	98
7.1.1.1.2	Toprak Devresi Boru Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı.....	99
7.1.1.1.3	Toprak Devresi Hafriyat Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı .....	101
7.1.1.2	Yıllık Enerji (İşletme) Maliyeti ( $C_e$ ).....	103
7.2	Düşey Borulu Toprak Isı Değiştiricisinin Termoekonomik İncelemesi.....	103
7.2.1	Amaç Fonksiyonu.....	106
7.2.1.1	Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı ( $C_i$ ).....	107
7.2.1.1.1	Pompa Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı.....	107
7.2.1.1.2	Toprak Devresi Boru Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı.....	108
7.2.1.1.3	Toprak Devresi Sondaj Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı.....	109

7.2.1.2	Yıllık Enerji (İşletme) Maliyeti ( $C_e$ ).....	110
7.3	Sonuçlar .....	110
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	117
	KAYNAKLAR.....	121
	EKLER .....	126
	Ek 1 Isıl çift kalibrasyon eğri denklemleri ( $y=ax+b$ ) .....	127
	ÖZGEÇMİŞ.....	128

## SİMGE LİSTESİ

a	Borular arası mesafe (m)
$a_{\text{boru}}$	Isı değiştiricisi boru birim alan maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m <sup>2</sup> yıl)
$A_{\text{boru}}$	Toprak ısı değiştiricisi boru yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$a_{\text{hafriyat}}$	Derinlik ve boy birim kesit alan hafriyat maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m <sup>2</sup> yıl)
$A_{\text{hafriyat}}$	Toprak ısı değiştiricisi hafriyat derinlik kesit alanı (m <sup>2</sup> )
B	Coğrafi konum enlemi
b	Yüzeyin yutuculuğu ve aydınlatılmasına bağlı bir katsayı
$b_1$	Pompa birim güç maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl kW)
$b_2$	Birim enerji için yıllık işletme saatleri bedeli (para/yıl kW)
BHM	Birim hacim hafriyat maliyeti (para/m <sup>3</sup> )
C	Düzgün olmayan ısı akısı için düzeltme faktörü
$C_e$	Yıllık enerji (işletme) maliyeti (para/yıl)
$C_i$	Yatırım maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl)
$C_p$	Akışkanın özgül ısısı (J/kg K)
$C_{pb}$	Boru malzemesinin özgül ısısı (J/kg K)
$C_s$	Suyun özgül ısısı (J/kg K)
d	Boru çapı (m)
D	Güneşin eğim açısı
$D_e$	Gizli ısı değişim katsayısı (m/s)
$D_h$	Duyulur ısı değişim katsayısı (m/s)
$e_h$	Atmosferik buhar basıncı (Pa)
$e_y$	Yüzeydeki buhar basıncı (Pa)
f	Sürtünme faktörü (boyutsuz)
f	Yüzey örtüsü ve toprak nemine bağlı bir katsayı (boyutsuz)
F(u)	Rüzgâr hızının bir fonksiyonu
$F_{\text{ref}}$	Referans fonksiyon (W yıl/para)
$F_z$	Zaman faktörünü içeren integral
g	Yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )
$g_0$	Kaynaktaki birim boy ısı üretimi (W/m)
GB	Güneşin batışı (saat dakika)
GD	Güneşin doğuşu (saat dakika)
$G_v$	Hafriyat (kepçe ağzı) genişliği (m)
H	Deniz seviyesinden yükseklik (m)
h	Gömme derinliği (m)
$h_{\text{akışkan}}$	Isı taşıyıcı akışkanın taşınım ısı geçiş katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$h_c$	Taşınım ısı geçiş katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$h_{sb}$	Suyun buharlaşma gizli ısı ( J/kg)
$h_y$	Taşınım ısı geçişi katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
I	Toplam yaygın ışı nım (W/m <sup>2</sup> )
$I(X_{r_d})$	Üssel integral
$I_R$	Yağış yoğunluğu (kg/m <sup>2</sup> s)
i	Faiz oranı
$k_a$	Akışkanın ısı l iletkenliği (W/m K)
$k_t$	Toprağın ısı l iletkenliği (W/m K)
$k_{t,\text{üst}}$	Toprak üst tabakasının ısı l iletkenliği (W/m K)
$k_b$	Boru ısı l iletkenliği (W/m K)
$k_{\text{kar}}$	Kar örtüsünün ısı l iletkenliği (W/m K)
L	Boru boyu (m)

L	Coğrafi konumun boylamı
L	Modül boru uzunluğu (m)
$L_s$	Kar örtüsünün süblimasyon gizli ısısı (J/kg)
$\dot{m}_a$	Akışkanın kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}'_{yağış}$	Birim zamanda birim alana düşen yağış miktarı su eşdeğeri (kg/s)
$\dot{m}'_s$	Birim zamanda birim alandan buharlaşan su miktarı (kg/s)
$M_{boru}$	Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti (para/m <sup>2</sup> )
$M_{hafriyat}$	Derinlik ve boy birim kesit alan maliyeti (para/m <sup>2</sup> )
$M_{pompa}$	Birim güç için pompa maliyeti (para/kW)
n	Modül sayısı
$N_i$	U-boru sayısı
Nu	Nusselt sayısı (boyutsuz)
$P_h$	Havanın buhar basıncı (Pa)
$P_y$	Yüzeydeki buhar basıncı (Pa)
P	Periyot (s)
P	Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)
$P_h$	Atmosferik basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı (boyutsuz)
$q'$	Birim boru boyundan geçen ısı miktarı (W/m)
$q'_{taşınım}$	Yüzeyde taşınım ile olan ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$q'_{güneş}$	Yüzeğe gelen güneş ışınımı (W/m <sup>2</sup> )
$q'_{yağmur, kar-gizli}$	Eriyen kar ve yoğunlaşan / buharlaşan su nedeniyle oluşan gizli ısı (W/m <sup>2</sup> )
$q'_{uzundalg a}$	Uzun dalga yayılan ışınım (W/m <sup>2</sup> )
$q'_{yağmur, kar-duyulur}$	Yağan yağmur ve karla gelen duyulur ısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q'$	Birim boy için aktarılan ısı miktarı (W/m)
$Q_C$	Yüzeydeki kar örtüsünden geçen iletimsel ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_E$	Yüzeydeki buharlaşma nedeniyle oluşan gizli ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_H$	Yüzeyden yayılan uzun dalga ışınımı ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{LI}$	Yüzeğe gelen uzun dalga ışınımı ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_P$	Yüzeyde yağış nedeniyle oluşan ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{SI}$	Yüzeğe gelen güneş ışınımı ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{top}$	Yüzeydeki toplam ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )
r	Borunun merkezinden itibaren mesafe (m)
R	Referans boylam (Zaman dilimi*15)
$r_d$	Boru dış yarıçapı (m)
Re	Reynolds sayısı (boyutsuz)
$r_i$	Boru iç yarıçapı (m)
Ri	Richardson sayısı (boyutsuz)
$R_b$	Düşey bir U boru için boru direnci
$R_{kd}$	Kısa devre direnci
S	Toprak üst yüzeyine gelen güneş ışınımı (W/m <sup>2</sup> )
$S_{gen}$	Yıllık güneş ışınımındaki salınımın genliği (W/m <sup>2</sup> )
$S_{ort}$	Yüzeydeki ortalama yıllık güneş enerjisi (W/m <sup>2</sup> )
t	Başlangıçtan itibaren zaman (h)
T	Çizgisel kaynaktan istenilen mesafedeki toprak sıcaklığı (°C)
t	Periyot başlangıcından itibaren süre (s)
t	Zaman (h)

$T$	Zaman eşitliği (Equation of Time)
$T_a$	Akışkan sıcaklığı (K)
$T_{(m,n)}$	Yüzeydeki düğüm noktası (m,n koordinatındaki) sıcaklığı (K)
$T_0$	Toprağın başlangıç anındaki sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{t,gen}$	Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_2$	Gökyüzü sıcaklığı veya alt yüzey açıkta ise toprak sıcaklığı (K)
$T_h$	Hava sıcaklığı (K)
$T_{t,alt}$	Toprağın üst tabakasının altındaki sıcaklık (K)
$T_{kt}$	Kuru termometre sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{çn}}$	Günlük çığ noktası sıcaklığı (K)
$T_{ort}$	Yıllık ortalama sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{t,ort}$	Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_y$	Toprak üst yüzeyi sıcaklığı (K)
$T_y$	Toprak veya kar örtüsünün üst yüzey sıcaklığı (K)
$T_{a,g}$	Akışkanın giriş sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{a,\text{ç}}$	Akışkanın çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_t$	Toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_b$	Boru cidar sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$U_z$	Yüzeyden z kadar yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
$v$	Yıl olarak proje ömrü veya sistemin kendini amorti etmesi istenilen süre
$V_a$	Akışkan debisi ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$W$	Pompa gücü (kW)
$x$	Gömme derinliği (m)
$z$	Referans yüksekliği (m)
$z_0$	Pürüz yüksekliği (m)
$z_{t,\text{üst}}$	Toprak üst tabakasının kalınlığı (m)
$z_{\text{kar},\text{üst}}$	Kar örtüsünün kalınlığı (m)
$\alpha$	Yüzeyin yutuculuğu
$\alpha_t$	Toprağın yayıcılığı ( $\text{m}^2/\text{h}$ )
$\beta$	İntegral değişkeni
$\varepsilon$	Yüzeyin yayıcılığı (boyutsuz)
$\zeta$	Kararlılık fonksiyonu (boyutsuz)
$\kappa$	Von Karman sabiti (boyutsuz)
$\mu$	Viskozite (kg/ms)
$\rho$	Toprağın yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_h$	Havanın yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	Stefan-Boltzmann sabiti ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ )
$\tau$	Boyutsuz sıcaklık farkı
$\phi_1$	Faz farkı (rad)
$\omega$	Açısal hız (rad)
$\rho_a$	Akışkanın yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\Delta x$	X yönündeki ilerleme (m)
$\Delta y$	Y yönündeki ilerleme (m)

## **KISALTMA LİSTESİ**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADI	Alternatig Direction Implicit (Değişken yön sonlu fark çözüm yöntemi)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Amerika Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği)
COP	Coefficient of Performance (Etkinlik katsayısı)
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association (Uluslararası Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Derneği)
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir mantıksal denetleyici)
PPRC	Poly Propilen Random Co-Polymer
TKIP	Toprak kaynaklı ısı pompası
TRNSYS	Transient System Simulation (Paket program)



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yatay toprak ısı değiştiricili sistem.....	1
Şekil 1.2 Düşey toprak ısı değiştiricili sistem.....	2
Şekil 2.1 Farklı tiplerdeki toprak ısı değiştiricileri.....	7
Şekil 2.2 Paralel ve seri akışlı yatay toprak ısı değiştiricileri.....	8
Şekil 2.3 Kesit geometrilerine göre düşey toprak ısı değiştiricileri.....	9
Şekil 2.4 Paket tip toprak kaynaklı ısı pompası.....	11
Şekil 2.5 Soğutma kulesi ilave edilmiş sistem.....	12
Şekil 2.6 Güneş kolektörü destekli sistem.....	12
Şekil 2.7 Toprak kaynaklı ısı pompasının işleyişi ve ısı dağıtım sistemi seçenekleri.....	14
Şekil 2.8 Çoklu ısı pompası sistemi ile ısı dağıtımı.....	14
Şekil 2.9 Değişik sitemlerin performanslarının mukayesesi(Diz, 2001).....	15
Şekil 3.1 Denklemler ve sınır koşulları.....	29
Şekil 3.2 Katı ortamdaki sıcaklık dağılımı.....	30
Şekil 3.3 Sonlu fark ızgarası ve sınır koşullarını gösteren çözüm bölgesi.....	35
Şekil 3.4 Isı değiştiricisi akışkan dönüş sıcaklığı ve birikmiş ısı aktarımı.....	37
Şekil 3.5 Akışkandaki kontrol uzunluğundaki enerji dengesi.....	39
Şekil 3.6 Geçici rejimde hesaplanan sıcaklıklar.....	40
Şekil 3.7 Beş dakika sonra topraktaki sıcaklık dağılımının karşılaştırılması.....	41
Şekil 3.8 Başlangıçtan 10 dakika sonraki sıcaklık ve nem dağılımı.....	42
Şekil 3.9 Başlangıçtan 60 dakika sonraki sıcaklık ve nem dağılımı.....	42
Şekil 3.10 Yarı sonsuz ortama gömülmüş boru geometrisi.....	43
Şekil 3.11 Düzensiz ızgara yapısı: düğüm noktalarının numaralandırılması.....	44
Şekil 3.12 Basitleştirilmiş problem için analitik ve sayısal çözümler.....	45
Şekil 3.13 Sabit sıcaklık eğrileri (°C), $z/R_o=0.55$ , $t=16.8$ saat, $Y_c=0.9$ m, $N_{Re}=1100$ .....	45
Şekil 3.14 Sabit sıcaklık eğrileri (°C), $z/R_o=3.33$ , $t=16.8$ saat, $Y_c=0.9$ m, $N_{Re}=1100$ .....	46
Şekil 4.1 Paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisi.....	48
Şekil 4.3 Seçilen çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı.....	50
Şekil 4.4 Matematiksel olarak öngörülen toprak yüzey sıcaklığı değişimi.....	52
Şekil 4.5 Toprak sıcaklığındaki değişimin derinlikle ilişkisi.....	53
Şekil 4.6 Toprak sıcaklığı salınımı (Diz, 2001).....	54
Şekil 4.7 Hesaplanan ve ölçülen toprak sıcaklıkları (İstanbul-Göztepe).....	55
Şekil 4.8 Boru boyunca meydana gelen ısı geçişi.....	62
Şekil 5.1 MATLAB ortamında geliştirilen programın ekran görüntüsü.....	69
Şekil 5.3 Izgara aralığı ve zaman adımının sonuçlara etkisi.....	71
Şekil 5.4 Kış şartlarında akışkanın ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı.....	72
Şekil 5.5 Kış şartlarında akışkan çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.6 Yaz şartlarında akışkanın ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı.....	74
Şekil 5.7 Yaz şartlarında akışkan çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.8 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi.....	76
Şekil 5.9 Toprak yüzeyinden itibaren toprak sıcaklığının düşeydeki değişimi.....	76
Şekil 5.10 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi.....	77
Şekil 5.11 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi.....	78
Şekil 5.12 Toprak yüzeyinden itibaren toprak sıcaklığının düşeydeki değişimi.....	78
Şekil 6.1 Toprak ısı değiştiricisinin yerleşimi.....	81
Şekil 6.2 Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi.....	81
Şekil 6.3 Toprak ısı değiştiricisi hafriyat ve sıcaklık ölçüm detayı.....	82
Şekil 6.4 Deneyde kullanılan ısı pompasının şematik gösterimi.....	83
Şekil 6.5 Deney tesisatında kullanılan ısı pompası.....	84
Şekil 6.6 Isıl çiftlerin toprak içinde yerleşimi.....	84

Şekil 6.7 Isıl çiftlerin boru ve toprak içinde yerleşimi .....	85
Şekil 6.8 PLC ve ısıl çiftlerin bağlantısı.....	85
Şekil 6.9 Kabin içi ölçüm ve kontrol sistemi .....	86
Şekil 6.10 Ölçülen toprak ısı iletim katsayısı ve ortalaması .....	88
Şekil 6.11 Deneysel su giriş sıcaklığı ve deneysel/teorik su çıkış sıcaklıkları karşılaştırılması	89
Şekil 6.12 Düşey eksenindeki sıcaklık dağılımı (1 saat).....	90
Şekil 6.13 Düşey eksenindeki sıcaklık dağılımı (50 saat).....	90
Şekil 6.14 Düşey eksenindeki sıcaklık dağılımı (250 saat).....	91
Şekil 6.15 Düşey eksenindeki sıcaklık dağılımı (910 saat).....	91
Şekil 6.16 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (1 saat).....	92
Şekil 6.17 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (50 saat).....	92
Şekil 6.18 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (250 saat).....	93
Şekil 6.19 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (910 saat).....	93
Şekil 6.20 Topraktan çekilen günlük ısı miktarı.....	94
Şekil 6.21 Topraktan çekilen birikmiş ısı miktarı .....	94
Şekil 7.1. Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi devresi .....	96
Şekil 7.2 Hafriyat değişkenleri .....	102
Şekil 7.3 Farklı türde yatay borulu ısı değiştiricileri.....	103
Şekil 7.4 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=2000$ W).....	111
Şekil 7.5 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=3000$ W).....	111
Şekil 7.6 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=5000$ W).....	112
Şekil 7.7 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve toprağın ısıl iletkenliğine bağlı değişimi.....	112
Şekil 7.8 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve modül sayısına bağlı değişimi( $Q=2000$ W).....	113
Şekil 7.9 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve modül sayısına bağlı değişimi ( $Q=5000$ W).....	114
Şekil 7.10 $F_{ref}$ 'in boru çapı ve ısıl kapasiteye bağlı değişimi .....	114
Şekil 7.11 Boru çapı ve ısıl kapasiteye bağlı $F_{ref}$ fonksiyonunun değişimi.....	115
Şekil 7.12 Boru çapı ve modül sayısına bağlı $F_{ref}$ fonksiyonunun değişimi ( $Q=5000$ W).....	116
Şekil 8.1 Deneysel ve teorik toprak sıcaklıkları .....	118

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 7.1 $M_{\text{boru}}$ hesaplama cetveli .....	100
Çizelge 7.2 Boru çapına göre yaklaşık $a_{\text{boru}}$ oranları .....	101

## ÖNSÖZ

Bu tezde toprak kaynaklı ısı pompalarında ilk yatırım maliyetini ve performansı en çok etkileyen toprak ısı değiştiricileri incelenmiş ve optimum dizayn şartları elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir parametrenin ısı değiştiricisi boyutu üzerine etkisi hesaplara dâhil edilmiştir. Yapılan teorik çalışma bir bilgisayar programı haline getirilmiş ve deneysel çalışma ile de desteklenmiştir.

Öncelikle tez danışmanım sayın Prof. Dr. Galip TEMİR'e çalışmam boyunca yaptığı yardımlar ve göstermiş olduğu özveriden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca gerek maddi gerek manevi her türlü desteğini esirgemeyen sayın Doç Dr. Ahmet KOYUN'a, tez izleme jürimde bulunan sayın Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN'a ve sayın Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOğLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca bana destek veren tüm mesai arkadaşlarıma başta Nuri Alpay KÜREKCI, şevket Özgür ATAYILMAZ, Ahmet Selim DALKILIÇ ve Mustafa Kemal SEVİNDİR olmak üzere teşekkür ederim. Bu çalışmanın konuyla ilgilenen meslektaşlarıma yararlı olmasını dilerim.

Hakan DEMİR

## ÖZET

Jeokütle; ısıtma sezonunda havadan daha yüksek, soğutma sezonu için de havadan daha düşük sıcaklıklara sahip enerji kaynağıdır. Jeokütlenin enerjisini yaşam alanlarına aktarmak amacıyla toprak kaynaklı ısı pompaları geliştirilmiştir. Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması hava ve su kaynaklı sistemlere göre daha pahalıdır. Toprak kaynaklı ısı pompalarının en önemli bileşenleri toprak ısı değiştiricileri olup toprak altına gömülü borulardan oluşur. Bu borular yardımıyla, toprağın enerjisi ısı taşıyıcı akışkana veya çevrimin atık ısısı, ısı taşıyıcı akışkandan toprağa aktarılır. Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği toprak ısı değiştiricisinin seçimi ve boyutlandırmasında etkili parametrelerdir.

Toprak özelliklerinin iklim şartları ve ısı geçişi nedeniyle değişmesi, tasarım aşamasında toprak ısı değiştiricisinin boyutlandırılmasıyla ilgili hesapların yapılmasını güçleştirir. Amerika ve Avrupa'nın değişik yerleşim bölgelerinde kurulmuş olan toprak kaynaklı birçok ısı pompası tasarım ve uygulaması hazırlanan örnek modeller üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler esas alınarak yapılmaktadır. Bunun dışında, ısı pompası sistemi tasarımı, çok fazla değişken içeren modeller esas alınarak da yapılabilmektedir.

Konuyla ilgili mevcut çalışmalar incelendiğinde toprak ısı değiştiricisinin tasarımı ve boyutlandırılmasında iki tip analitik çözüm yöntemi benimsenmiştir. Birincisi Kelvin Çizgisel Kaynak Yöntemi, diğeri Silindirik Kaynak Yöntemi'dir. Ayrıca bunların haricinde sayısal, analitik veya her ikisini de içeren birçok çalışma yapılmıştır. Çizgisel veya silindirik kaynak yöntemleri kullanıldığında, yakın borular arası ısıl etkileşimi ve boru ile toprak ara yüzeyindeki direnci hesaba katmak için bu modellerde çeşitli değişiklikler yapılması gerekir. Ayrıca ele alınan sınır koşulları ve basitleştirmeler problemin çözümünde bu modellerin yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Farklı geometrideki (U-boru, helisel vb.) ısı değiştiricilerinin çizgisel kaynak modeli kullanarak hesaplanmasında biri birine yakın borulardaki ısıl etkileşim bir düzeltme faktörü ile hesaplara dâhil edilmektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşım çok kısa süreler için yapılan hesaplarda önemli hatalara yol açar. Analitik modellerle toprak yüzeyinde gerçekleşen olayların dinamik sınır koşulları yardımıyla hesaplara dâhil edilmesi şu ana kadar mümkün olmamıştır. Ancak, iyi bir yaklaşım için toprak yüzeyinde gerçekleşen taşınım, ışınlım, buharlaşma ile olan ısı geçişi ve bitki örtüsü gibi tüm etkenlerin modele dâhil edilmesi gereklidir. Gerek analitik gerekse sayısal modellerde toprağın başlangıçtaki derinliğe göre değişen sıcaklık dağılımı göz önüne alınmamıştır. Bunun en büyük sebebi boru geometrisinden dolayı ısı geçişinin silindirik koordinatlarda ifade edilmesidir. Yüzey etkilerini kısmen hesaba katan sayısal modeller ise topraktaki sıcaklık dağılımını kararlı hal koşullarında vermektedir.

Yukarıda anlatılan tüm bu eksiklikler göz önüne alınarak topraktaki sıcaklık dağılımını üç boyutlu ve zamana bağlı olarak bulmak üzere yeni bir model geliştirilmiştir. Topraktaki ısı geçişi olayı, kütle geçişi ihmal edildiğinde, en genel ve en geniş hali ile üç boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimidir. Ancak boru eksenine paralel yönde sıcaklık değişimi ihmal edilebilecek mertebededir. Bu sebeple ısı iletimi denkleminin boru eksenine dik düzlemde iki boyutlu çözümünü araştırılmıştır. Enerjin korunumu yardımıyla boru boyunca sıcaklık dağılımı ifade edilerek iki boyutlu çözüm bölgeleri biri birleriyle ilişkilendirilmiştir. Sınır şartları ve denklemlerin karmaşıklığı nedeniyle şu ana kadar bir analitik çözüm yöntemi geliştirilemediğinden problemin sayısal yöntemlerle çözülmesine karar verilmiştir. Sayısal çözüm yöntemleri arasında başlıca iki yöntem öne çıkmaktadır. Bunlar sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleridir. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık geometrilerde sonlu farklar yöntemine göre önemli ölçüde esneklik sağlar. Bununla beraber bu metot daha karmaşık notasyon içerir ve daha fazla bilgisayar belleği ve işlemci gücü gerektirir. Bu nedenle

problemin çözümünde daha basit formülasyona sahip sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Çok boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimi probleminin çözümünde açık, kapalı, Crank-Nicholson veya birleşik yöntemlerden herhangi biri kullanılabilir. Açık formülasyonda üç boyutlu zamana bağlı ısı iletimi denkleminin çözümünün kararlı bir yapıda olması için kullanabileceğimiz zaman aralığı çok küçüktür ve andırım için gereken süre daha uzundur. Bu sebeple Değişken Yön Kapalı (ADI) formülasyon yöntemi tercih edilmiştir. Çözüm her zaman adımı ve ızgara aralığı için karardır ve daha büyük zaman adımları kullanmamıza olanak tanır. Neticede elde edilen matris sistemi tridiagonal'dir ve çözümü Thomas algoritması kullanılarak kolaylıkla bulunabilir. Zamana bağlı ısı iletimi denklemini sınır koşulları yardımıyla çözmek üzere MATLAB ortamında bir program geliştirilmiştir. Programda çözüm parametrelerini optimize etmek için farklı ızgara aralıkları ve zaman adımlarında andırımlar yapılmış ve bunların sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çözüm parametreleri olarak x ve y yönünde 0.05 m, z yönünde 1 m ızgara aralığı ve 1800 s zaman adımı kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar yeterli hassasiyettedir. Sonuçların güvenilirliği Mei'nin yaptığı çalışma ile kıyaslanarak sınanmış ve andırım sonuçlarının Mei'nin modeli ve deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Andırım sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak paralel borulardan oluşan yatay toprak ısı değiştiricisi için ideal gömme derinliğinin en az 1.6 m ve uzun süre topraktan ısı çekilmesi durumunda boruların biri birlerini etkilememeleri için aradaki mesafenin en az 3.0 m olması gerektiği görülmüştür. Ayrıca burada ısı pompasının günlük ve yıl boyu çalışma bilgileri kullanılarak optimizasyon yapılması daha uygun olacaktır. Çünkü bizim verdiğimiz değerler uzun süreli ve aralıksız ısı pompası çalışma şartına göredir. Aralıklı çalışan bir ısı pompası için borular arası mesafe elverdiği oranda daha da düşük alınabilir. Bu sayede gerekli toprak yüzey alanı azaltılabilir.

Deneysel çalışmadaki amaç gerçek paralel borulu yatay bir toprak ısı değiştiricisinin performansını incelemek ve matematiksel modelin geçerliliğini kanıtlamak için çeşitli veriler elde etmektir. Bu amaçla 4 kW ısıtma kapasitesine sahip bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. Isı pompası buharlaştırıcısında ortamdan 2.7 kW ısı çekilebilmektedir. Yoğuşturucu tarafında ise ortama 4 kW ısı aktarmaktadır. Isı pompası yazın soğutma ve kışın ısıtma amaçlı kullanıma uygundur. Isı pompasının toprak ısı değiştiricisi her biri 40 m boyunda 3 adet 20/2.7 mm paralel PPRC borudan ve 50 mm anma çapında PPRC kolektörlerden oluşmaktadır. Daha önceki bölümde andırımdan elde edilen bilgiler ışığında borular 1.8 m derinliğe gömülmüştür. Borular arası mesafe ise 3 m olarak seçilmiştir. Bu şekilde toprak ısı değiştiricisinden maksimum verim elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu toprak ısı değiştiricisi yardımıyla 4 kW'lık enerjiyi toprağa aktarmak veya topraktan çekmek mümkündür. Toprak kaynaklı ısı pompası deney sistemi Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü'nde 800 m<sup>2</sup> açık arazi üzerinde kurulmuştur. Toprak ısı değiştiricisinin bulunduğu bölgede ağaç bulunmamaktadır ve tüm yüzey etkilerini (ışınım vb.) görmek mümkündür. 13 Aralık 2005 – 20 Ocak 2006 tarihleri arasında toplam 37 gün boyunca toprak içerisine ve toprak ısı değiştiricisinin giriş ve çıkışına yerleştirilmiş toplam 34 adet T tipi ısı çifti yardımıyla sıcaklık verisi toplanmıştır. Isıl çiftler toplam 64 kanallı bir PLC sistemine bağlıdır. PLC kendi dâhili hafızasında her kanaldan saatte bir veri almak koşuluyla 8 günlük veriyi saklayabilmektedir. Ayrıca akışkan debisi de bu zaman zarfında sürekli ölçülmüştür. Ölçülen deneysel su giriş sıcaklıkları andırım için su giriş sıcaklıkları olarak kullanılmış ve 910 saatlik su çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik günlük ortalama su çıkış sıcaklıkları arasındaki fark en fazla % 10.03 kadardır. Andırım sonucunda 37 günlük toprak sıcaklığı dağılımı da hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada borudan itibaren yatayda ve düşeyde çeşitli mesafelere yerleştirilmiş ısı çiftleri kullanılarak sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Deneysel ve teorik toprak sıcaklığı dağılımları uyumludur. 910 saat sonucunda toprak içindeki yatay ve

düseydeki sıcaklık dağılımı hesaplamalarla öngörülen biçimde gerçekleşmiştir.

Son bölümde, sonlu zaman termoeconomik optimizasyon modeli kullanılarak, yatay paralel borulu ve düşey U-borulu toprak ısı değiştiricilerinin termoeconomik incelemesi yapılmıştır. Bunun için toplam maliyet olarak yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınmış ve bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonu üzerinde etkili olan değişkenler üzerinde parametrik bir çalışma yapılmış; toprağın ısı iletim katsayısı, modül sayısı, ısı kapasite, boru çapı ve gömme derinliğinin bu amaç fonksiyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yatay borulu toprak ısı değiştiricilerinin düşey U-borulu toprak ısı değiştiricilerinden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi düşey U-boru toprak ısı değiştiricilerinin sondaj maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Bu nedenle mevcut şartlarda düşey U-borulu toprak ısı değiştiricileri yatay paralel borulu toprak ısı değiştiricileri ile rekabet edebilmesi mümkün değildir. Halen 80 YTL/m olan sondaj maliyetinin 30 YTL/m ve daha aşağıya çekilmesi durumunda düşey U-borulu toprak ısı değiştiricileri daha avantajlı hale gelmektedir. Ayrıca tek bir boru için kapasite arttıkça referans fonksiyon sıfıra yaklaşmaktadır. Bu nedenle, her iki sistemde de, çok uzun boylu tek bir boru yerine birden fazla boru kullanılması daha uygundur.

**Anahtar kelimeler:** Toprak kaynaklı ısı pompası, paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisi, U-borulu toprak ısı değiştiricisi, sayısal çözüm, termoeconomik optimizasyon

## ABSTRACT

Ground is an energy resource which has more appropriate and stable temperatures than air. Ground source heat pumps (GSHP) were developed to use ground energy for residential heating. Using ground as a heat source is more expensive than air and water. The most important part of a GSHP is the ground heat exchanger (GHE) that consists of pipes buried in the soil and is used for transferring heat between the soil and the heat exchanger of the GSHP. Soil composition, density, moisture and burial depth of pipes affect the size of a GHE.

Since the thermal properties of soil change in time, it is difficult to calculate the size of GHE properly. Design of GSHP systems in different regions of US and Europe is performed using data from an experimental model. However, there are many more techniques including some complex calculations for sizing GHEs.

In literature, there are two kinds of analytical approaches. The first one is the Kelvin Linear Source Theory and the other one is the Cylindrical Source Theory. In addition, there are many two or three dimensional steady and time dependent numerical techniques. Some modifications must be done to Cylindrical Source and Kelvin Linear Source theories to include effects of adjacent pipes. A simplification of boundary conditions to solve equations analytically causes some error on results especially shorter simulation times. Kelvin Linear Source and Cylindrical Source theories find only symmetrical soil temperature distributions around the pipe. Analytical models do not consider the temperature change of soil by depth and the surface effects such as radiation, convection and surface cover are not included. In order to simulate all the weather conditions, all these effects must be included in the model.

To find three dimensional temperature distributions in the soil, a new model including all the weather effects in real life was suggested. Heat transfer in the soil is a time dependent, three dimensional heat conduction. Temperature gradient along the pipe axis is so small that it can be neglected and the heat conduction equation can be solved using dynamical boundary conditions in two-dimensional geometry. By means of conservation of energy, the temperature distribution of the fluid along the pipe was calculated and used for linking two dimensional solution domains. Because of the complexity of the boundary conditions, the heat conduction equation has been solved numerically using Alternating Direction Implicit (ADI) Finite Difference formulation. ADI method is stable for every time step and grid size and the resulting matrix system is tri-diagonal. Tri-diagonal matrix systems can be solved easily using the Thomas algorithm. For this purpose, software was developed in MATLAB environment and the effects of solution parameters on the results were investigated. The simulation results were acceptable when a mesh size of 0.05 m in x and y directions, 1 m in z direction and 1800 s as time step were used. A simulation was carried out with simplified boundary conditions to compare results with Mei's work. Results show good agreement with Mei's work and experimental data. A parametrical study on burial depth and distance between pipes was performed to obtain thermally efficient GHE dimensions. For continuous operation of a GSHP, the burial depth and the distance between the pipes are suggested as 1.6 m and 3 m respectively.

An experimental study was carried out to show the validity of the model. A GSHP having 4 kW heating and 2.7 kW cooling was used. A ground heat exchanger consists of three parallel pipes with 40 m length and ½" diameter buried in soil at 1.8 m depth. The distance between the parallel pipes is 3 m. An experimental GSHP system was installed at Yıldız Technical University Davupaşa Campus on 800 m<sup>2</sup> area with no surface cover. Temperature data were collected during 37 days using 32 T-type thermocouples buried in soil horizontally and vertically at various distances from the pipe center and 2 T-type thermocouples at the inlet and outlet of the ground heat exchanger. Experimental and numerical simulation



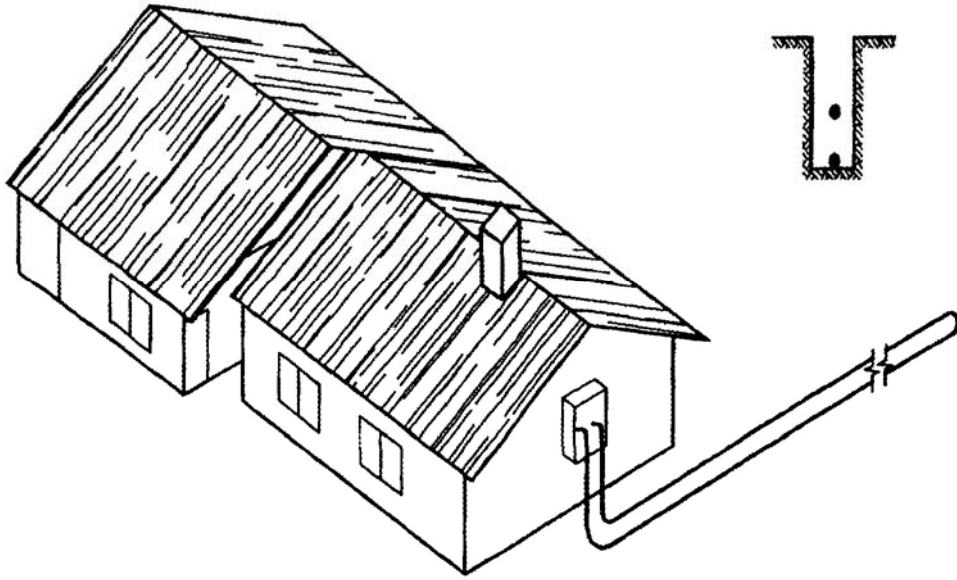
results using experimental water inlet temperatures were compared. All the thermocouples were connected to a 64 channel PLC system capable of saving data of hourly temperature measurements for 8 days. Collected fluid inlet temperatures were used in the numerical simulation and the fluid outlet temperatures were calculated for 910 hours. The maximum difference between the numerical results and the experimental data is 10.03%. The temperature distribution in the soil was calculated and compared with experimental data also. Both horizontal and vertical temperature profiles matched the experimental data well.

In the last chapter of the thesis, a thermo-economical analysis was accomplished for parallel pipe horizontal and vertical U-tube ground heat exchangers using finite time thermodynamics. Installation and operating costs were taken into account as total cost and a reference function was described. The effects of soil thermal conductivity, number of pipes, thermal capacity, pipe diameter and burial depth on reference function were examined. Because of higher installation cost of U-tube GHEs, it is recommended to use parallel pipe GHE for the same thermal capacity. To make the installation cost same for parallel pipe horizontal and vertical U-tube GHEs, the borehole cost must be \$23/m while it is \$62/m today. Additionally, using two or more pipes instead of a single long pipe is suggested because the reference function goes to zero for all diameters with increasing thermal capacity.

**Keywords:** Ground source heat pump, parallel pipe horizontal ground heat exchanger, U-tube ground heat exchanger, numerical solution, thermo-economic optimization.

## 1. GİRİŞ

Toprak kaynaklı ısı pompası toprağı ısı kaynağı veya ısı çukuru olarak kullanan bir ısı pompası sistemidir. Toprak kaynaklı bir ısı pompası toprakla, toprak ısı değıştiricisi yardımıyla ilişkilendirilmiştir. Yatay ve dikey yerleşim olmak üzere temelde iki tip uygulaması vardır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de bu iki temel düzen görölmektedir. Toprak ısı değıştiricisi doğrudan genişmeli veya ikincil akışkanlı olabilir. Doğrudan genişmeli tipte toprak ısı değıştiricisi ara bir ısı değıştiricisi olmadan doğrudan buharlaştırıcı veya yoğuşturucu olarak kullanılır. İkincil akışkanlı tipte ise, ısı pompası ile toprak arasındaki ısı transferi ikincil bir devre ve ikincil bir akışkan (su veya antifrizli su çözeltisi) ile sağlanır.



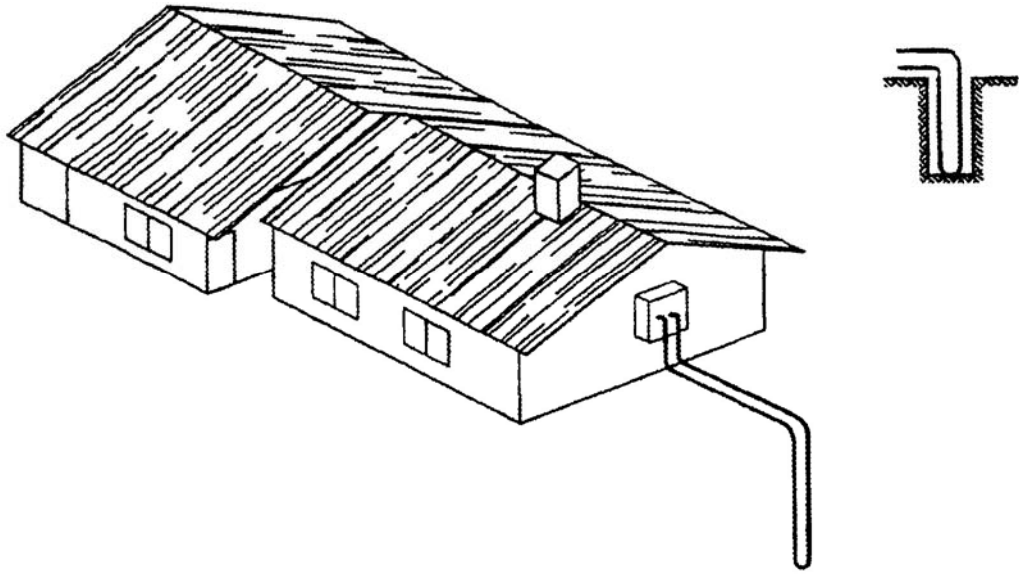
Şekil 1.1 Yatay toprak ısı değıştiricili sistem

Büyük ısıl kapasitesi ve kararlı işletme koşulları toprağı ısı kaynağı veya çukuru olarak kullanmayı cazip hale getirir. Yaklaşık 2 m derinlikteki toprak sıcaklığı o bölgedeki yıllık ortalama hava sıcaklığı kadardır ve çok az değışim gösterir. Bu, havayla karşılaştırıldığında, ısıtma için yüksek sıcaklıkta ve kararlı bir kaynak sıcaklığı ve soğutma için düşük ve kararlı bir çukur sıcaklığı sunar. Bu nedenle toprak kaynaklı ısı pompaları hava kaynaklı ısı pompalarıyla karşılaştırıldığında daha az enerji tüketir.

Aynı iklim şartlarında toprak kaynaklı ısı pompaları hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksek etkinlik değerlerine sahiptirler (Piechowski ve Charters, 1995). Bunun nedeni daha uygun sıcaklık aralıklarında çalışmalarıdır.

Toprağı ısı kaynağı olarak kullanan ısı pompası için ilk patent başvurusu 1912'de İsviçre'de Heinrich Zoeley (Wirth, 1995) tarafından yapılmıştır. Bu tarih toprak kaynaklı ısı pompasının resmi doğuşu gibi olmasına rağmen gerçekte fikir daha eskilere dayanmaktadır (Prestwich, 1886; Everet, 1860, 1862, 1873; Thomson 1860).

Toprak kaynaklı ısı pompası üzerine yapılan mevcut çalışmalar daha çok ilk yatırım maliyetini azaltmaya yöneliktir. Bu da toprak ısı değiştiricisinin detaylı ve doğru incelenmesi ve tasarımı ile mümkündür. Ayrıca yeni malzemeler ve yeni kurulum yöntemlerinin de geliştirilmesi toprak ısı değiştiricilerinin gelişmesine yardımcı olacaktır.



Şekil 1.2 Düşey toprak ısı değiştiricili sistem

Kaynaklarda toprak ısı değiştiricisi akışkan çıkış sıcaklığı için çözüm sunan birçok model bulunmaktadır. Bununla beraber ısı geçişi eşitliklerinin analitik ve sayısal çözümünü içeren iki farklı yaklaşım daha vardır. Analitik çözümler genellikle bir kabuller dizisi içerdüğinden detaylı bir inceleme için uygun değildir ve sadece tahmini yaklaşımlar için kullanılmaktadır. Diğer yandan sayısal çözüm yöntemleri daha karmaşık ve daha doğru çözümlemelere olanak tanır. Bu ise daha çok girdi, daha çok bilgisayar gücü ve daha büyük bilgisayar belleği gerektirir.

## 2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Güneş, bizim en büyük enerji kaynağımızdır. Kullandığımız tüm enerji kaynakları güneş enerjisinden türemektedir. Ancak, kararsız yapısı nedeniyle doğrudan depolanması ve kullanılması pahalı ve güçtür. Büyük bir kütleyle sahip olan jeokütle, yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin hemen hemen yarısını yutarak bünyesinde barındırır. Dolayısıyla yeryüzü, güneş enerjisini depolayarak soğutma sezonunda dış havadan daha düşük sıcaklıklara, ısıtma sezonunda ise dış havadan daha yüksek sıcaklıklara sahip bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkar. Güneş ışınlarının yeryüzüne çarpmasıyla jeokütlede depolanan ısı enerjisini yaşam alanlarına aktarmak amacıyla, toprak kaynaklı ısı pompaları tasarlanmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompasının diğer ısı pompası sistemlerinden farkı, toprak kaynaklı sistemlerde, ısı taşıyan akışkan ile jeokütlenin bir toprak ısı değiştiricisi kullanılarak birleştirilmesidir. Yalnız, doğrudan genleşmeli sistemlerde ısı taşıyan akışkan jeokütle ile doğrudan temas etmektedir. Toprak ısı değiştiricileri, jeokütle içine yatay veya düşey olarak yerleştirilebilirler. Yatay ısı değiştiriciler genellikle 1-3 m, düşey ısı değiştiricileri ise 20-100 m derinliğe yerleştirilirler.

Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması hava ve su kaynaklı sistemlere göre daha pahalıdır. Toprağın altına gömülen borulardan oluşan sisteme toprak ısı değiştiricisi denir. Bu borular yardımıyla, toprağın ısısı ısı taşıyıcı akışkana veya çevrimin atık ısısı, ısı taşıyıcı akışkandan toprağa aktarılır. Toprak altına gömülen borularda ısı taşıyıcı akışkan olarak, su ve antifriz karışımı veya doğrudan genleşmeli sistemlerde soğutucu akışkanın kendisi dolaşır. Toprağın içine gömülü borularda doğrudan soğutucu akışkan kullanmak soğutucu akışkan ihtiyacının artmasına sebep olur. Buna bağlı olarak soğutucu akışkanın pahalı olması nedeniyle, genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak boru içerisinde su ve antifriz karışımı dolaşır.

Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği toprak ısı değiştiricisinin seçimini ve boyutlandırılmasını etkiler. Toprak özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi ve ayrıca ısı pompası sisteminin çalışması sırasında boruların etrafında belirli bir bölgede ısı alış verişinden dolayı toprak özelliklerinin değişmesi, tasarım aşamasında ilgili hesaplamaların yapılmasını güçleştirir. Isı pompası ısıtma sezonunda kullanıldığında, toprak ısı değiştiricisine yakın bölgelerde toprağın ısısı suya aktarıldığından toprak sıcaklığı düşer. Dolayısıyla bu bölgede nem miktarı ve toprak özellikleri değişir. Isı taşıyıcı akışkanın buharlaştırıcıya giriş sıcaklığı da aynı sebepten ötürü düşer. Bu nedenle ısı pompası kapasitesi ve ısıtma tesir katsayısı da doğrudan etkilenir. Soğuk bölgelerde, ısıtma yapıldığı süre içerisinde toprağa yeteri kadar ısı girişi olmazsa, kış aylarında topraktan sürekli

çekilen ısı nedeniyle, toprağın donma tehlikesi mevcuttur.

Ancak ısı kaynağı olarak toprak, havaya göre daha uygun sıcaklıklara sahiptir ve sıcaklık değişimi daha karardır. Ayrıca, salamura-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerinin hava-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerine göre daha düşük sıcaklık farkında çalışması toprak kaynaklı sistemlerin bir diğer avantajlı yanıdır.

Toprak kaynaklı ısı pompası toprak ısı değiştiricisinin uygun derinliğe gömülmesi belirli miktarda hafriyat veya delme gideri gerektirerek ilk yatırım maliyetinin artmasına sebep olur. Bunun yanı sıra kullanılması halinde yatay toprak ısı değiştiricisinin belirli bir bahçe alanı gerektirmesi toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin kullanımını kısıtlayan bir diğer etkindir.

## **2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Çalışma Şekli ve Elemanları**

Toprak kaynaklı ısı pompaları konutlarda ısıtma, soğutma ve nem kontrolü sağlar. Ayrıca, ilave ısıtma sağlayarak veya alışıl gelmiş sıcak su üreticilerinin yerine geçerek sıcak su temininde de kullanılabilir. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde üç ana kısım veya alt sistem bulunmaktadır. Bunlar:

- Toprak ısı değiştiricileri: Isı taşıyıcı akışkan ile jeokütlenin temasının sağlayarak ısı alışverişine imkân sağlayan boru düzenleri,
- Isı pompası: Jeokütleden alınan ısıyı binaya aktaran sistem,
- Isı dağıtım sistemi: Bina içindeki mahalleri ısıtmak veya soğutmak için kullanılan sistem.

Ayrıca, bu sistemlerde binanın sıcak su ihtiyacını desteklemek amacıyla kızgın buhar soğutucusu veya sıcak su ihtiyacının tümünü karşılamak üzere sıcak su üreticisi bulunur. Isıtma sezonunda ısı, toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla toprak ısı değiştiricisinde dolaşan akışkandan çekilir ve hava kanallı sistemlerle veya sıcak sulu sistemlerle binaya dağıtılır. Soğutma sezonunda ise ısı, soğutulacak ortamdan çekilerek toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla toprak ısı değiştiricisine oradan da jeokütleye aktarılır.

### **2.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi**

Toprak ısı değiştiricileri, gömülerek jeokütle ile teması sağlayan boru düzenleridir. Isıtma sezonunda, jeokütlenin enerjisini ısı taşıyıcı akışkan yardımıyla ısı pompasının buharlaştırıcısına aktararak soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlarken soğutma sezonunda da ısı pompasının yaşam alanlarından çektiği ısıyı ısı pompasının yoğuşturucusundan alıp

jeokütleyle atarak çevrimini tamamlar.

Toprak ısı değiştircileri kapalı çevrim esasına göre çalışır. Toprak ısı değiştircilerinde ısı taşıyıcı akışkanın yenilenmesine gerek yoktur. Dolayısıyla bu sistemlerde kullanılan ısı taşıyıcı akışkan miktarı değişmez. Aynı akışkan ısı pompasında kullanıldıktan sonra, tekrar ısıtılmak veya tekrar soğutulmak üzere toprak ısı değiştircisinde dolaştırılır.

Boru düzenleri düşey veya yatay olabildiği gibi spiral, helisel ve benzeri geometrilerde de olabilir. Bu geometrileri belirlerken boruların birbirleriyle olan ısı etkileşimleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Toprak kaynaklı ısı değiştircilerinde toprağa gömülen borular polietilen malzemeden yapılmaktadır ve genellikle içlerinden su ve antifriz karışımı dolaştırılmaktadır. Yalnızca doğrudan genişmeli sistemlerde su ve antifriz karışımı yerine ısı pompasının soğutucu akışkanı dolaştırılır. Bu durumda salamurayı dolaştırmak için ilave pompa ve ısı değiştircisi ihtiyacı ortadan kalkar. Bu sistemlerde bakırdan yapılmış boru düzenleri kullanılır ve ara ısı değiştircisi olmadığı için bu sistemler daha verimlidir.

Toprak ısı değiştircileri, içerisindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış şekline göre seri veya paralel olarak tasarlanabilirler. Sistemin seri veya paralel olarak seçilmesi, sistem etkinliğini, pompalama ihtiyacını ve maliyetini etkiler. Seri tipte tek bir akış yolu mevcuttur. Paralel tipte ise birkaç akış yolu mevcuttur. Her iki akış türünün de avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Seri sistemin avantajlarını tek bir akış yolu bulunmasından dolayı tek tip ve boyutta boru kullanılabilmesi, sistemden hava almanın paralel sistemden daha kolay olması, boru çapının daha büyük olması nedeniyle birim boydaki borunun ısı etkinliğinin daha iyi olması şeklinde sıralayabiliriz.

Seri sistemin dezavantajları ise; boru çaplarının daha büyük olması nedeniyle sistem içerisinde daha fazla ısı taşıyıcı akışkan dolaştırılması ve dolayısıyla daha fazla antifriz gerektirmesi, boru ve işçilik maliyetinin daha fazla olması, akışkan basınç kaybının boru çapına ve boyuna bağlı olarak artması nedeniyle pompalama giderlerinin artması ve bundan dolayı toprak ısı değiştircisinin boru boyunun sınırlı olmasıdır.

Paralel sistemin avantajlarını kullanılan boru çapının daha küçük olması nedeniyle boru maliyetinin daha az olması, dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkan miktarının ve gerekli antifriz miktarının daha az olması, basınç kayıplarının daha az olması ve bun bağlı olarak pompalama giderlerinin ve dolayısıyla işletme maliyetinin daha az olması şeklinde sıralayabiliriz.

Paralel sistemin dezavantajları ise; sistemin havasının alınmasının zor olması ve dengeli bir akış ve sistem boyu elde edilebilmesi için boru güzergâhındaki akış dengesinin sağlanmasıdır.

### **2.1.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi Türleri**

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricileri üç ana grup altında toplanır.

- Kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricileri,
- Açık çevrimli toprak ısı değiştiricileri,
- Doğrudan genişmeli toprak ısı değiştiricileri.

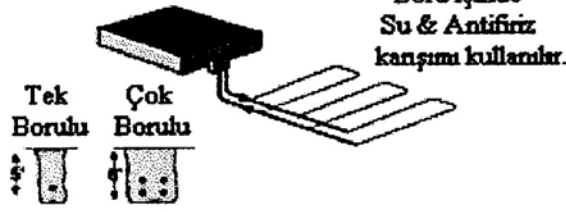
Kullanılan toprak ısı değiştiricileri ısı pompası sisteminin etkinliğini, işletme giderlerini ve ilk yatırım maliyetini etkiler. En verimli toprak ısı değiştiricisi türünün seçiminde coğrafi özelliklerin, arsa alanının ve sistem ekonomikliğinin göz önünde bulundurulması gerekir. Şekil 2.1’de çeşitli tip ısı değiştiricileri görülmektedir.

#### **2.1.1.1.1 Kapalı Çevrimli Sistemler**

Kapalı çevrimli sistemler yeraltına gömülü bir boru şebekesinden oluşur ve bu şebekeyi oluşturan yüksek güçlü plastik borular ısı değiştiricisi vazifesi görürler. Boru şebekesi ısı taşıyıcı akışkanla doldurulur ve genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak su veya su-antifriz karışımı kullanılır. Kapalı çevrimli sistemlerde, ısı taşıyıcı akışkanın borular içerisinde dolaşımını sağlamak üzere, bir pompa bulunur.

Tüm sistem göz önüne alındığında toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri soğutucu akışkan ile yaşam alanı arasında, ısı taşıyıcı akışkan ile soğutucu akışkan arasında ve ısı taşıyıcı akışkan ile jeokütle arasında toplam üç adet çevrim gerçekleştirirler. Soğutucu akışkan çevrimi ile ısı taşıyıcı akışkan arasındaki enerji alışverişi bir ısı değiştirici vasıtasıyla sağlanır. Bu ısı değiştiricisi, toprak ısı değiştiricisi ile ısı pompası sisteminin ortak bir elemandır ve soğutma sezonunda soğutucu akışkanın yoğuşmasını sağlarken ısıtma sezonunda buharlaşmasını sağlar. Yazın soğutma ihtiyaçları nedeniyle toprak ısı değiştiricisindeki akışkanın sıcaklığı artar ve soğutucu akışkandan aldığı bu ısıyı daha düşük sıcaklıktaki toprağa verir ve çevrimini tamamlar. Kışın ise ısıtma ihtiyaçları nedeniyle sıcaklığı düşen ısı taşıyıcı akışkan kaybettiği enerjisini kendinden daha yüksek sıcaklıkta olan topraktan alarak çevrimini tamamlar. Kapalı çevrimli sistemlerde toprak ısı değiştiricilerinin yatay, spiral, düşey ve yüzey suyuna daldırılmış değişik kurulumları vardır.

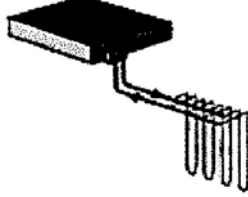
### 1) Yatay Kapah Çevrim



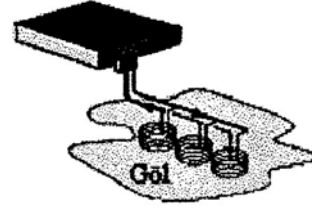
### 2) Spiral Kapah Çevrim



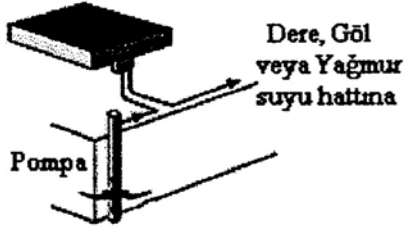
### 3) Düşey Kapah Çevrim



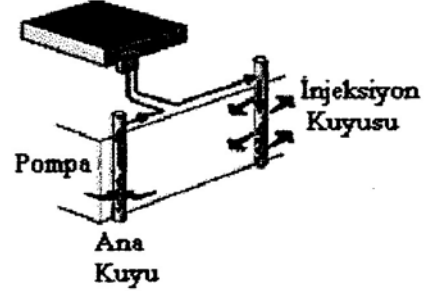
### 4) Yer Üstü Su Kaynaklı Kapah Çevrim



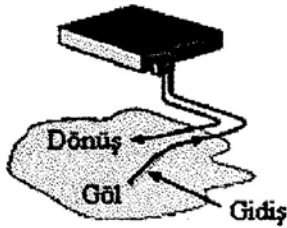
### 5) Tek Kuyulu Açık Çevrim



### 6) Çift Kuyulu Açık Çevrim



### 7) Yer Üstü Su Kaynaklı Açık Çevrim



### 8) Direkt Genleşmeli Sistem



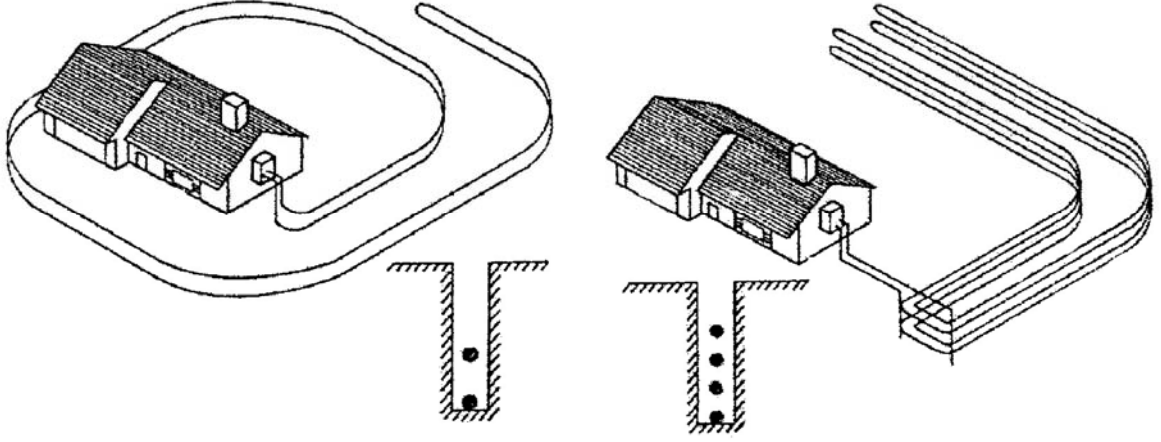
Şekil 2.1 Farklı tiplerdeki toprak ısı değiştircileri

Şekil 2.1.1'de gösterilen yatay toprak ısı değiştircileri genellikle arsa alanının uygun olması durumunda kullanılır. Yatay sistemler tek bir hendek veya birbirine yakın hendekler içerisinde bir veya daha fazla borunun yerleştirilmesiyle oluşur. Bu ısı değiştircilerinin etkinlik derecesi borular arasındaki mesafeye bağlıdır.

Yatay toprak ısı değiştircileri ısı taşıyıcı akışkanın akış tipine göre seri veya paralel olarak sınıflandırılabilirler (Şekil 2.2). Bununla beraber toplam hendek uzunluğunu kısaltmak



amacıyla tek bir hendek içerisinde birkaç boru yerleştirilebilir. Borular, yüzey şartlarından en az etkilenmeleri amacıyla, genelde 1.2-3.0 m derinlikte döşenirler.



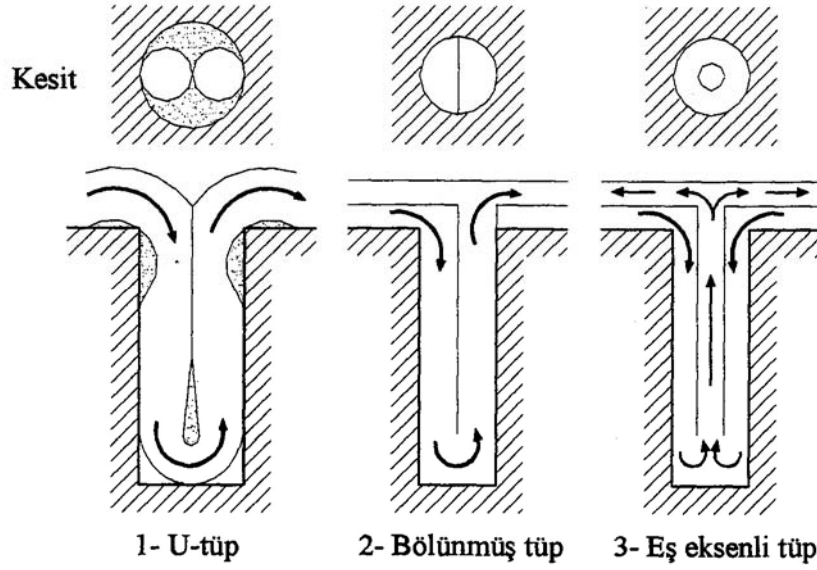
Şekil 2.2 Paralel ve seri akışlı yatay toprak ısı değiştiricileri

Çok borulu yatay ısı toprak değiştiricilerinin bir diğer çeşidi de spiral toprak ısı değiştiricileridir. Şekil 2.1.2’de gösterildiği gibi spiral toprak ısı değiştiricileri yatay dizilişe sahip, hendeklerin içine yerleştirilmiş sarmal yapıda borulardan oluşmaktadır. Spiral toprak ısı değiştiricilerin bir başka kurulum şekli de, dar düşey hendeklerin içerisine dik olarak sarmal boruların yerleştirilmesi ile elde edilir.

Şekil 2.1.3’de gösterilen düşey toprak ısı değiştiricileri genellikle arsa alanının kısıtlı olduğu durumlarda kullanılır. Kuyuların derinlikleri genellikle 22.9-91.4 m arasındadır. Kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricisindeki borular düşey kuyunun içerisinden geçirilirler. Toprak ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin tasarımında ısı değiştiricisinin döşenmesi gereken alanın azaltılmasının bir amaç olduğu düşünülürse, düşey toprak ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin diğer sistemlere üstünlüğü ortaya çıkar.

Genellikle çoklu kuyu sistemlerine ihtiyaç duyulur ve kuyular birbirlerinden 3.0-4.9 m aralıklarla yerleştirilir. Toplam ısı ihtiyacını karşılamak için borular seri veya paralel olarak yerleştirilebilirler.

Arsa alanlarının sınırlı olduğu, su tabakasının yüzeyden çok derinde olduğu durumlarda ve zeminin kayalık olduğu durumlarda bu sistemler yaygın olarak kullanılır. Düşey toprak ısı değiştiricilerinin kesit geometrilerine göre üç basit tipi bulunmaktadır (Ataman, 1985): U tüp, bölünmüş tüp ve eş eksenli tüp (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Kesit geometrilerine göre düşey toprak ısı değıştircileri

Düşey ısı değıştircilerinin yatay ısı değıştircilerine göre bazı avantajları vardır. Düşey ısı değıştircilerinde genellikle boruların büyük bir bölümü toprak altındaki sulu bölgede yani toprağın düşük ısı direnç gösteren bölümündedir ve yeraltı sularının hareketleri ısı değıştircisinin iyilik derecesini yükseltmektedir. Ancak, dönüş ve besleme borularını aynı deliğe yerleştirme zorunluluğu, ısı geçişi bakımından kısa devreye sebebiyet vereceğinden, düşey tiplerin yerleştirilmesinde bu husus göz önünde bulundurulmalıdır. Borular arasındaki ısı geçişi, ısı değıştircisi iyilik derecesinin düşmesine neden olur ve bu etki delik boyuyla birlikte artar.

Diğer yandan yatay ısı değıştircisinin etkinlik derecesi ısıtma ve soğutma mevsimleri boyunca yağmur, kar ve diğer yüzey olayları sebebiyle, ısı değıştircisinin yüzeye yakınlığı ile orantılı olarak etkilenir.

Eğer ortalama boyutlarda göl veya gölet mevcutsa Şekil 2.1.4'te gösterildiği gibi toprak ısı değıştircisi su kaynaklarına daldırılarak tesis edilebilir. Bu tip sistemlerde, hava şartlarına bağlı olarak, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için uygun alan ve derinliğe ihtiyaç duyulur.

#### 2.1.1.1.2 Açık Çevrimli Sistemler

Açık sistemlerde, kapalı sistemlerdeki ısı taşıyıcı akışkan yerine, ısı kaynağı olarak kullanılan yerüstü veya yeraltı suyu doğrudan ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanılır. Açık sistemler öncelikle suyun çekildiği ana kuyulardan, ana ve enjeksiyon kuyularından veya yüzey su

sistemlerinden oluşurlar. Bu üç durum Şekil 2.1.5, 2.1.6 ve 2.1.7'de gösterilmiştir.

Eğer ısı kaynağındaki su miktarı kısıtlı ise, ana kuyudan çekilen su ısı pompası ısı değiştiricisinde ısınıp aktarıldıktan sonra, bir daha kullanılmamak üzere atılır. Aksi takdirde kullanılan su kaynağına geri verilirse, kaynak sıcaklığının düşmesi tehlikesiyle karşı karşıya kalınır. Bazen enjeksiyon kuyuları kullanılarak suyun önemli bir kısmı kaynağına geri verilir ve kullanılmadan dışarı atılan su miktarı azaltılır.

Açık sistemleri tasarlarırken birkaç özel faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci önemli faktör kullanılan suyun kalitesidir. Açık çevrimli sistemlerde soğutucu akışkan ile yerüstü veya yeraltı suyu arasındaki ısı değiştiricisi kirlenme, korozyon veya tıkanma tehlikesi ile karşı karşıyadır. İkinci önemli faktör ısı kaynağı veya kuyusu olarak kullanılan su kütlesinin yeterliliğidir. Üçüncü önemli faktör dönüş suyunun ne yapılacağına belirlenmesidir. Dönüş yeraltı veya yerüstü suyu enjeksiyon kuyuları ile toprağına geri verilebildiğı gibi göl, ırmak gibi yüzey sistemlerine aktarılabilir. Bu konuda yerel kanunlar veya düzenlemeler açık sistemin fizibilitesini etkileyebilir. Kuyu tasarımına bağılı olarak açık sistemler, tüm toprak kaynaklı ısı değiştiricileri kurulumlarından daha fazla pompalama yüküne ihtiyaç duyar. Bununla birlikte, ideal şartlarda, açık çevrim uygulaması toprak ısı değiştiricisi sistemleri içinde en ekonomik olanıdır.

### **2.1.1.1.3 Doğrudan Genleşmeli Sistemler**

Yukarıda bahsedilen tüm toprak ısı değiştiricisi sistemlerinde toprakla soğutucu akışkan arasında ısı geçişi sağlamak için ikisi arasında bir ısı taşıyıcı akışkanlardan faydalanılır. Soğutucu akışkanla toprak arasındaki ısı geçişi döngüsünde ısı taşıyıcı akışkan kullanılması ısı pompası sisteminde sıkıştırma oranlarını yükseltir.

Şekil 2.1.8'de görüldüğü gibi doğrudan genleşmeli sistemlerde aradaki ısı taşıyıcı akışkana, ısı taşıyıcı akışkanla soğutucu akışkan arasındaki ısı değiştiricisine ve dolaşım pompasına gerek yoktur. Bakır borular soğutucu akışkan ile toprak arasındaki ısı geçişini doğrudan sağlamak için toprağına altına yerleştirilirler. Sonuç olarak, ısı geçişi özellikleri ve termodinamik performans artar. Borular, derin düşey çukurlara veya geniş yatay çukurlara gömülebilirler. Düşey yerleşimler kumlu, killi veya kuru topraklar için önerilmezler. Toprak ısı değiştiricisi metal olduğu için korozyona sebep olabilir. Kışın ısıtma amaçlı kullanımda, düşük toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı nedeniyle topraktaki nem donabilir. Biriken buzun genleşmesi borulara basınç uygulayarak bükülmesine sebep olabilir. Bununla nedenle toprak ısı değiştiricileri donma potansiyeli olan yeraltı su tabakalarına yakın bölgelere

yerleştirilmemelidir. Yazın soğutma amaçlı kullanımda, yüksek toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı topraktaki nemin buharlaşmasına sebep olabilir. Buna bağlı olarak nem miktarının değişmesi toprağın ısı geçişi özelliklerini değiştirir. Toprakla doğrudan genleşmeli sistem arasında çok aşırı sıcaklık farkı mevcut olduğundan bu durumlar tasarım aşamasında göz önüne alınmalıdır.

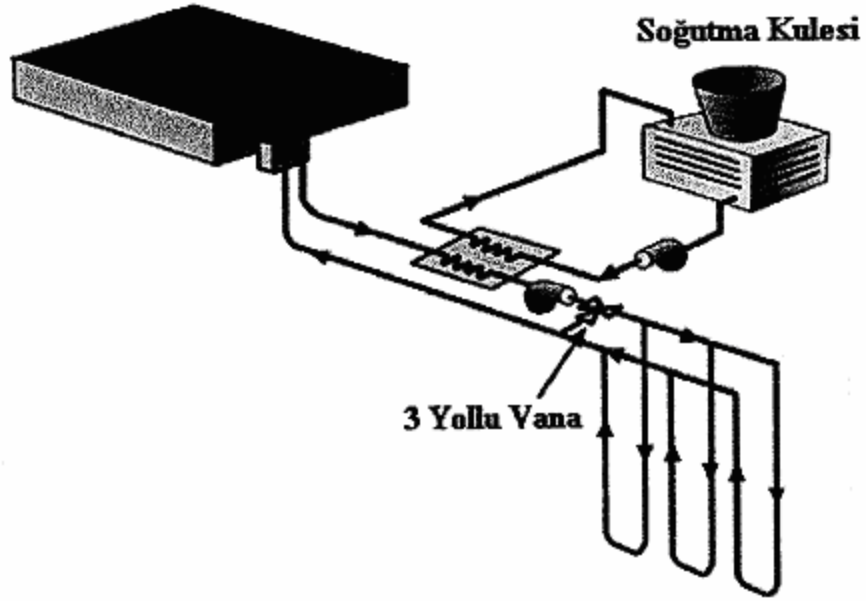
### 2.1.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası

Toprak kaynaklı ısı pompaları paket tip olup, klasik ısı pompası elemanları ile kontrol elemanlarını ve sıcak su üretimini sağlayan bir sistem içerir. Aynı zamanda, hava kanalı kullanarak ısı dağıtan sistemlerde, hava yönlendiricileri, fan, filtre ve iklimlendirme sistemi için yoğuşma suyu boşaltma sistemi bulunur. Şekil 2.4’de paket tip toprak kaynaklı ısı pompası görölmektedir. Şekil 2.4’de görölen ısı pompası hava kanallı bir dağıtım sistemi ile kullanılır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde yatırım maliyeti aşıından en önemli bölüm toprak ısı değiştiricileridir. Dolayısıyla, hem toprak kaynaklı ısı pompalarında sistem verimini arttırmak hem de toprak ısı değiştiricisinin boyutunu azaltabilmek için güneş enerjisinden ve soğutma kulesinden faydalanmak mümkündür.

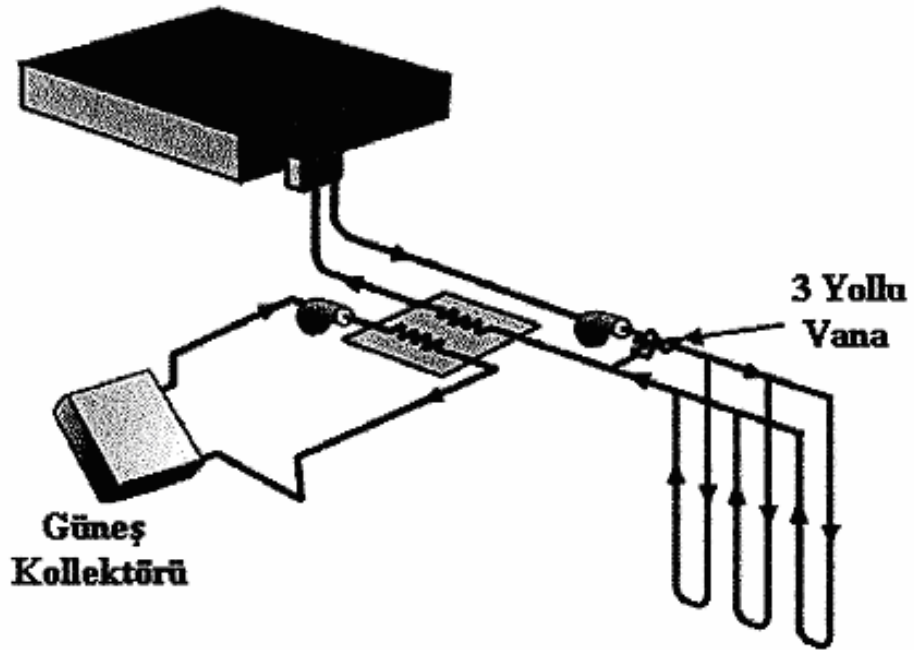


Şekil 2.4 Paket tip toprak kaynaklı ısı pompası



Şekil 2.5 Soğutma kulesi ilave edilmiş sistem

Güney iklim bölgelerinde veya ısıl yükü fazla olan ticari uygulamalarda soğutma yükünün sistem tasarımını zorlaştırıcı bir faktör olarak ortaya çıktığı durumlarda, ihtiyaç duyulan toprak ısı değiştiricisinin uzunluğu, soğutma kulesinin sisteme yardımcı olarak ilave edilmesi ile azaltılabilir.



Şekil 2.6 Güneş kolektörü destekli sistem

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, soğutma kulesi çevrimi, toprak ısı değiştiricisinin dönüş kısmına bir ısı değiştirici vasıtasıyla bağlanır. Soğutma kulesi çevriminin akış yönü toprak ısı değiştiricisinin içindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış yönünün ters olacak şekilde tasarlanarak ısı taşıyıcı akışkana ön soğutma yapar. Dolayısıyla toprak ısı değiştiricisinin içindeki ısı taşıyıcı akışkanın toprağa atması gereken ısı miktarı azalır.

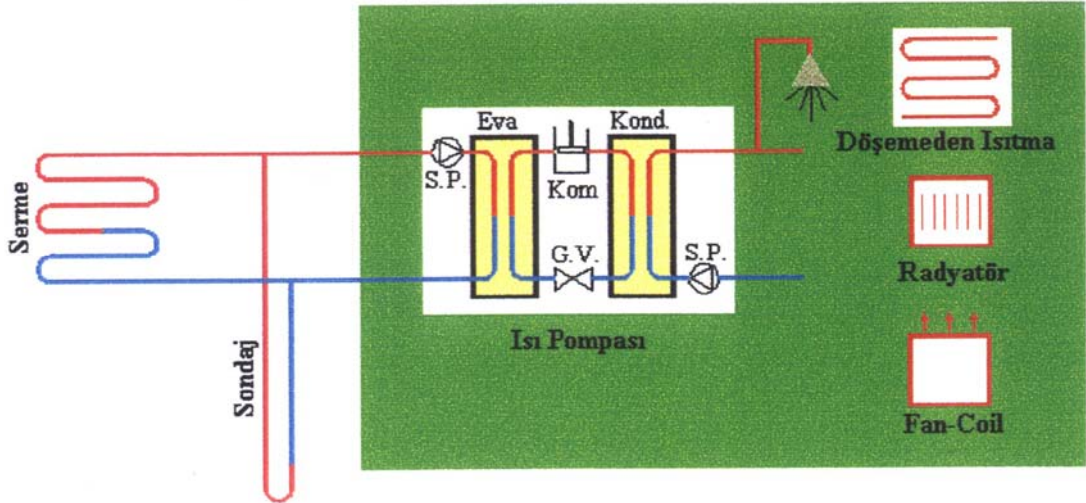
Kuzey iklim bölgelerinde, ısıtma yükünün sistem tasarımını zorlaştırıcı bir faktör olarak ortaya çıktığı durumlarda, ihtiyaç duyulan toprak ısı değiştiricisinin boyutları sisteme güneş kolektörlerinin ilave edilmesi ile azaltılabilir. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi güneş panelleri toprak ısı değiştiricisinin binaya giriş kısmına bir ısı değiştirici vasıtasıyla bağlanır. Paneller, ısı taşıyıcı akışkana ilave ısı sağlarlar. Bu tür bir sistemle ihtiyaç duyulan toprak ısı değiştiricisi boyutları küçültüleceği gibi ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığı artırılarak ısı pompası sisteminin verimliliği artırılabilir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları yaşam mahallerinin ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyacının üçünü birden sağlamaktadır. Özellikle sulu ısıtma ve kullanım sıcak suyunun sağlanmasında kazan ve donanımlarına ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ayrıca bu sistemlerde yakıtların yakılmasıyla kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi yerine ısının topraktan taşınarak elde edilmesi esas alındığından yakıt temini, depolanması ve maliyeti ortadan kalktığı gibi fosil kaynaklı yakıtların yakılmasıyla açığa çıkan çevre kirliliğinin de önüne geçilmiş olur. Tüm bunların yanı sıra toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanımı için özel bir elemana gerek yoktur.

Evlerdeki toprak kaynaklı ısı pompaları, genellikle bodrum katına, tavan arasına veya küçük mekanik odalara konulur. Ticari uygulamalarda ise asma tavan üstüne asılabilir veya ayrı bir konsola da konulabilir.

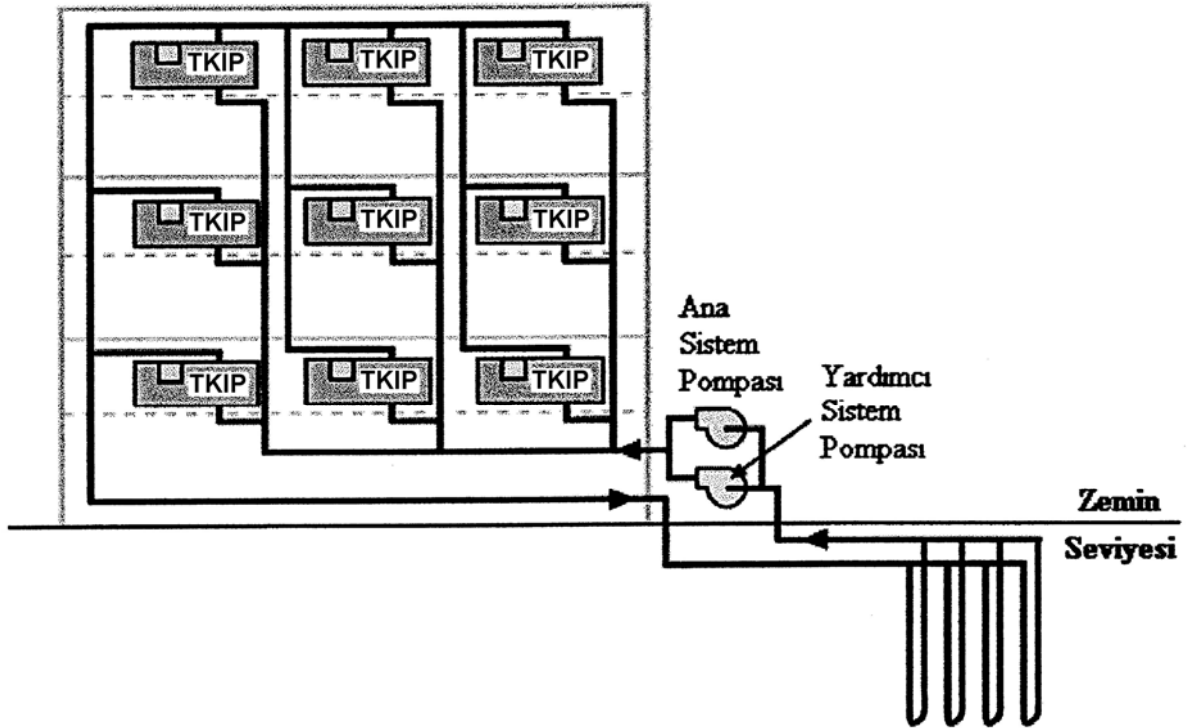
### **2.1.3 Dağıtım sistemi**

Dağıtım sistemi, ısı pompasının yaşam mahalline ısıyı aktarırken kullandığı ısı taşıyıcı akışkana göre tesis edilir. Burada ısı taşıyıcı akışkan hava veya su olabilir. Havalı sistemlerde sıcak veya soğuk havayı dağıtmak için alışla gelmiş hava dağıtım kanalları kullanılır. Sulu sistemlerde ise ısıtmada radyatör sistemleri ile döşemeden ısıtma sistemleri kullanılır. Isıtmanın yanı sıra binanın soğutma ihtiyacı mevcut ise fan-coil sistemi tercih edilmelidir. Şekil 2.7’de sulu dağıtım sistemine sahip toprak kaynaklı ısı pompasının işleyişi görülmektedir.



Şekil 2.7 Toprak kaynaklı ısı pompasının işleyişi ve ısı dağıtım sistemi seçenekleri

Okullar ve ofisler gibi büyük ticari yapılardaki sistemlerde her bir sınıf veya ofis için bir adet olmak üzere çoklu ısı pompaları kullanılarak tüm ısı pompalarını yapının içindeki bir çevrimle aynı toprak ısı değiştiricisine bağlamak mümkün olabilir. Bu durumda, dağıtılan ısı her bir mahal için ayrı ayrı kontrol edilmesi mümkündür (Şekil 2.8).

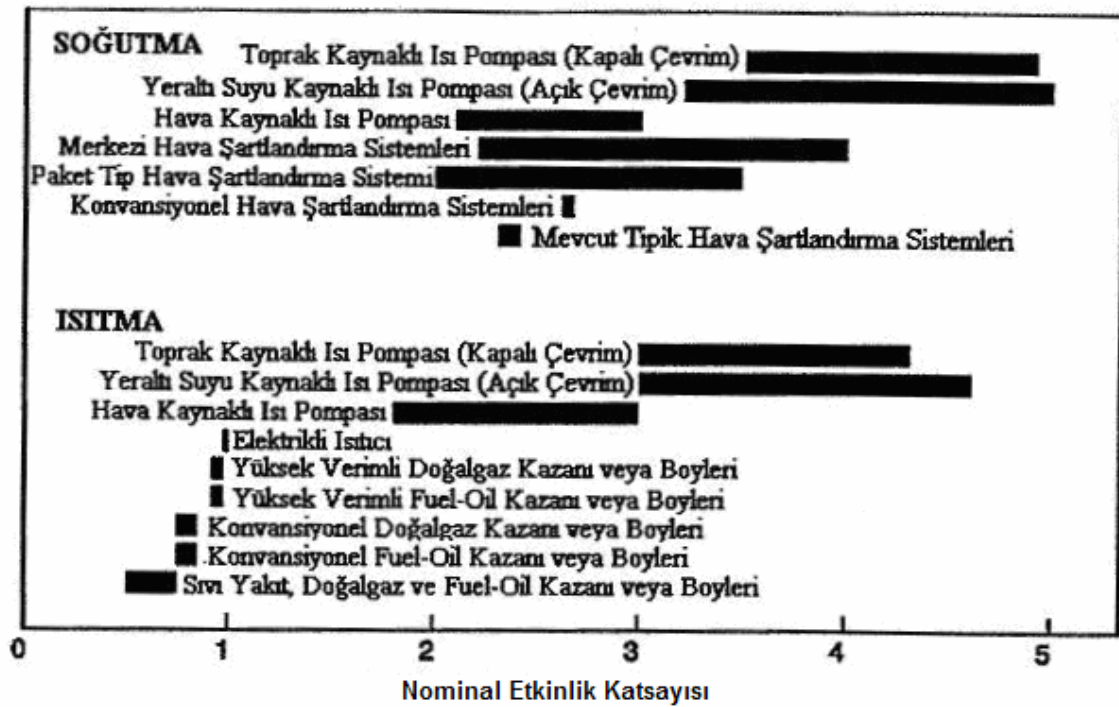


Şekil 2.8 Çoklu ısı pompası sistemi ile ısı dağıtımı

## 2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları

Toprak kaynaklı ısı pompalarının mevcut ısıtma ve soğutma yöntemlerine seçenek oluşturma, yerel hava kalitesine katkı sağlama, enerji temin sorunlarını çözmeye yardımcı olma, enerji giderlerini azaltma, tasarım esnekliği sağlama gibi bir dizi yararları vardır. Bunun yanı sıra toprak kaynaklı ısı pompalarının ilk yatırımının daha yüksek olması, etkinliğinin toprak ısı değiştiricisine ve donanımlarına bağlı olması gibi sakıncaları da mevcuttur.

Şekil 2.9'da değişik sistemlerin etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Burada yapılan karşılaştırmada birincil enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesi sırasındaki verim göz önüne alınmamıştır.



Şekil 2.9 Değişik sistemlerin performanslarının mukayesesi(Diz, 2001)

Toprak kaynaklı ısı pompaları aynı zamanda, büyük yapılarda yaygın olarak kullanılan merkezi ve değişken hava debili sistemlere kıyasla çok daha küçük fan ve pompa enerjisi gerektirir.

Konforu ve kısmi yükteki etkinliği sağlamak için karmaşık kontrol sistemleri gerekli olmadığından, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin maliyetini arttırmamak amacıyla, pahalı ve özel cihazların kullanılmaması önerilir. Her bölgede en iyi konforu sağlamak için yerel olarak kontrol edilebilen ayrı bir ısı pompası ile ısıtma veya soğutma yapılabilir. Toprak



kaynaklı ısı pompaları, göze hoş görünmeyen dış ünite olmadan kurulabilirler. Böylece dış etkenler, korozyon ve hava etkisi ile oluşabilecek sorunlara rastlanmaz. Tüm ısı pompası donanımı iç ünite şeklindedir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları tasarımda önemli ölçüde esneklik sağlar. Çünkü değişik boyut ve yerleşim şekillerinde tasarlanabilirler. Çoğu ticari yapılarda, iç yüklerden dolayı soğutma sistemleri ile yutulan ve çevreye atılan bir atık ısı mevcuttur. Bu atık ısı toprak kaynaklı ısı pompalarıyla sıcak su ihtiyacının karşılamak üzere kullanılabilir. Bu seçilen ısı pompalarındaki ısı geri kazanım ısı değiştiricileri ile veya sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulan sudan suya ısı pompası sistemleri yardımıyla gerçekleştirilebilir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, enerji ve bakım giderlerinin düşük olması ve donanım ömrünün uzun olması nedeniyle, yapım ve kullanım ömrü boyunca meydana gelen işletme giderleri göz önüne alındığında diğer sistemlerden daha avantajlıdır.

Tüm bu avantajlarına karşılık toprak kaynaklı ısı pompasının kullanımını kısıtlayan en önemli faktörler bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin diğerlerine göre daha yüksek olması ve jeotermal ısı kaynaklarına olan ilgisizliktir.

### 3. TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Amerika ve Avrupa'nın değişik yerleşim bölgelerinde kurulmuş olan birçok toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasında sistemin tasarımı, hazırlanan örnek modeller üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler esas alınarak yapılmaktadır. Bunun dışında, sistem tasarımı, daha karmaşık kabuller esas alınarak oluşturulan modellerin incelenmesi ile de yapılmaktadır.

Mevcut çalışmalarda toprak ısı değiştiricisinin tasarımı ve boyutlandırılmasında iki tip analitik çözüm yöntemi benimsenmiştir. Bunlardan birincisi Kelvin Çizgisel Kaynak Yöntemi'ne dayanmakta diğeri ise Silindirik Kaynak Yöntemi'ne dayanmaktadır. Ayrıca bunların haricinde sayısal, analitik veya her ikisini de içeren birçok çalışma yapılmıştır.

Toprağın ısı iletkenliğini bulmakta kullanılan yöntemler de kararlı ve geçici hal olmak üzere ikiye ayrılır. Kararlı hal yöntemlerinde ölçüm yapılırken örnek sıcaklığı sabittir. Geçici hal yöntemlerinde ise örnek sıcaklığı zamanla değişim gösterir.

#### 3.1 Toprak Isı Değiştiricilerinin Tasarımı ve Andırımı İçin Analitik Modeller

Bir toprak ısı değiştiricisinin kullanılabilirliği, ısıyı yıllarca temin edebilmesi ve çok fazla veya yetersiz ısı sağlamaması ile mümkündür. Böyle bir ısı değiştiricisini tasarlamakta kullanılan model de geçici rejim etkilerini uzun zaman aralıkları boyunca hesaplayabilmelidir.

##### 3.1.1 Ingersoll Yaklaşımı

Ingersoll (1948, 1954) Kelvin'in (1861) çizgisel kaynak teorisinden faydalanarak sonsuz ortamda herhangi bir noktadaki sıcaklığı elde etmiştir. Ortamın başlangıçta üniform bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu ve sonsuz uzunlukta ve sabit ısı oranındaki çizgisel kaynak ya da kuyunun bu anda çalıştırılmaya başlandığı varsayılmaktadır. Buna göre aşağıdaki denklem kullanılarak çizgisel kaynak veya kuyudan istenen uzaklıktaki bir bölgedeki sıcaklık değişimi, aktarılan ısı miktarı zaman ve toprak özellikleri esas alınarak hesaplanabilir.

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

ve

$$X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_t t}} \quad (3.2)$$

Burada;

T	: Çizgisel kaynaktan istenilen mesafedeki toprak sıcaklığı (°C) (boru çapına eşit uzaklık seçilirse borunun yüzey sıcaklığı bulunur),
T <sub>0</sub>	: Toprağın başlangıç anındaki sıcaklığı (°C),
Q'	: Birim boy için aktarılan ısı miktarı (W/m),
r	: Borunun merkezinden itibaren uzaklık (m),
k <sub>t</sub>	: Toprağın ısı iletkenliği (W/m K),
α <sub>t</sub>	: Toprağın ısı yayıcılığı = $\frac{k}{\rho_t C_p}$ (m <sup>2</sup> /h),
ρ <sub>t</sub>	: Toprağın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ),
t	: Başlangıçtan itibaren zaman (h),
β	: İntegral değişkeni'dir.

X'in 0.2'den küçük değerlerinde integral terimi aşağıdaki gibi alınabilir.

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

X'in diğer değerleri için I(X) integralinin değerleri Ingersoll vd. (1954) tarafından tablo halinde verilmiştir.

Ingersoll yaklaşımındaki ana varsayımlardan birisi kaynağın sonsuz uzunlukta olması ve ısı geçişinin sadece kaynak uzunluğuna dik yönde yani yarıçap doğrultusunda olmasıdır. Kaynaktan veya kaynağa ısı aktarımının sabit olmaması ve aydan aya değişmesi durumunda Ingersoll, (3.1)'deki integral teriminin, verilen zaman aralığında, ortalama ısı geçişi oranlarını dikkate alan iki parçaya ayrılmasını önermektedir. İntegrasyon sınırları belirli zaman aralıklarının başlangıç ve bitişine karşılık gelen integrale edilen değerler tarafından belirlenir. Ayrıca toprakla borunun mükemmel temas ettiği ve toprak özelliklerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Ingersoll'e göre (3.1) eşitliği sadece gerçek çizgisel kaynak için doğrudur. Ancak, çoğu ısı pompasında kullanılan 50 mm'den daha küçük çaplı borular için önemsenmeyecek kadar küçük bir hatayla kullanılabilir. Büyük çaplı borularda ve birkaç günden daha zaman aralıklarında boyutunu tahmin edebileceğimiz daha büyük hatalar oluşmaktadır. Hata terimi için ölçüt boyutsuz zaman/boru oranıdır. Bu değer 20'den büyük değerlerinde oluşacak hata uygulamada kabul edilebilecek düzeydedir. Bu oran;

$$z = \frac{\alpha_t t}{r^2} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Ingersoll yüksek ısı iletkenliğe sahip ıslak kil ve orta seviyedeki nemli toprak üzerinde çeşitli incelemeler ve karşılaştırmalar yapmıştır. Buna ek olarak kısa ve uzun borular ile sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı geçişi oranları için de çeşitli hesaplamalar yapmıştır.

Dikkat edilmesi gereken husus, Ingersoll yaklaşımı sadece ön hesaplamalarda kullanılabilir basit yaklaşımdan öteye gitmemektedir. Ingersoll 1948'deki yayınında uygulamada kullanılabilir bazı genellemelerde bulunmuş ancak sistem tasarımcılarını ilgilendiren ısı değiştirici uzunlukları, boruların birbirleriyle etkileşimi, uzun veya kısa zamanlı çalışmanın toprak üzerindeki etkileri, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının etkisi, toprak türünün etkinlik üzerindeki etkisi gibi konulara çok az değinmiştir.

Çizgisel kaynak denklemi zamanın çok kısa ve boru çapının çok büyük olması durumunda önemli hatalara sebep olur. Buradan yola çıkarak Jaeger bütün durumları kapsayan fakat değerlendirmesi zor bir denklem vermiştir. Sabit  $Q'$  ısı akısında ısı transfer eden bir boru için, başlangıçtaki etkilenmemiş toprak sıcaklığı ile borunun yakınında veya üzerinde göz önüne alınan herhangi bir noktanın etkilenmiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T$  aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

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

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

Burada;

$w$  : Birim yüzey alanı için aktarılan ısı miktarı ( $W/m^2$ )'dir.

$$p = \frac{R}{r} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. Örneğin  $p=5$  değeri ele alındığı zaman borunun merkezinden  $5r$  mesafesindeki sıcaklık anlaşılmalıdır.  $p=1$  değeri borunun yüzeyini ifade eder. " $r$ " borunun yarıçapıdır. Jaeger integrali  $R > 10r$  olması durumunda güvenilir sonuçlar vermez.

### 3.1.2 Hart ve Couvillion Yaklaşımı

Hart ve Couvillion (1986) çizgisel kaynak etrafındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımını ve

çizgisel kaynakla toprak arasındaki zamana bağlı sürekli ısı geçişini bulmak için Kelvin'in çizgisel kaynak denkleminden faydalanmıştır. Uzak bölge yarıçapı  $r_{\infty}$ 'u tanımlamak için çizgisel kaynak etrafındaki bölgede çizgisel kaynak tarafından atılan ısıyı içeren yaklaşık bir eşitlik elde edilmiştir. Hart ve Couvillion'a göre bu eşitlik yaklaşık bir eşitliktir çünkü Kelvin çizgisel kaynak denklemi çizgisel kaynak çalıştırıldıktan sonra sonsuz olmayan tüm yarıçaplarda etrafındaki topraktaki sıcaklık dağılımını yanlış tahmin etmektedir. Buna göre  $r_{\infty}$  için tek doğru değer  $r_{\infty} = \infty$  olacaktır. Buna rağmen Hart ve Couvillion bir rasgele uzak bölge yarıçapı varsaymıştır. Bu,

$$r_{\infty} = 4\sqrt{\alpha_t t} \quad (3.8)$$

ile ifade edilir.

Uzak alan yarıçapı dışındaki toprak sıcaklığının sabit ve düzgün olduğu varsayılmaktadır. Çizgisel kaynak eşitliği Ingersoll yaklaşımına benzer bir şekilde aşağıdaki gibidir:

$$T - T_0 = \frac{Q'}{4\pi k_y} \int_{\lambda}^{\infty} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda} d\lambda \quad (3.9)$$

Burada;

$\lambda$  : Integral değişkeni,

$$y = \frac{r^2}{4\alpha_t t} \quad (3.10)$$

'dir.

(3.9) eşitliğindeki integral terimi için çözüm integral tablolarından bulunur ve

$$\left[ y - \ln y - \gamma - \frac{y^2}{2(2!)} + \frac{y^3}{3(3!)} + \dots + \frac{(-1)^{N+1} y^N}{N(N!)} \right] \quad (3.11)$$

'e eşittir.

Burada  $\gamma$  Euler sabitidir ve değeri  $\gamma \approx 0.5772157$ '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 Hart ve Couvillion topraktaki sıcaklık dağılımı için aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir.

$$T - T_0 = \frac{Q'}{2\pi k_t} \left[ \ln \frac{r_\infty}{r} - 0.9818 + \frac{4r^2}{2r_\infty^2} - \frac{1}{4(2!)} \left( \frac{4r^2}{r_\infty^2} \right)^2 + \dots + \frac{(-1)^{N+1}}{2N(N!)} \left( \frac{4r^2}{r_\infty^2} \right)^N \right] \quad (3.12)$$

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

Hart ve Couvillion'un Kelvin çizgisel kaynak teorisine en önemli katkısı uzak bölge yarıçapı  $r_\infty$ 'u tanımlamasıdır. Bu bileşen çizgisel kaynak ile toprak arasında ısı geçişinin olduğu  $r_\infty$  yarıçapı uzaklığında bir bölgenin varlığını şart koşar.  $r_\infty$  mesafesinden daha uzaktaki toprak sıcaklığı düzgün ve sabit uzak bölge sıcaklığına eşittir ve bu uzak bölge yarıçapı toprağın ısı yayıcılığına ve çizgisel kaynağın işletme zamanına bağlıdır. Birden çok çizgisel kaynak olması durumunda kaynaklar arasında herhangi bir etkileşimin olmaması için  $r_\infty$ 'un kaynaklar arası mesafeden daha küçük olması gerekir. Eğer  $r_\infty$ , kaynaklar arası mesafeye eşit ve daha büyük olursa ısı etkileşim meydana gelir ve bu üst üste bindirme teknikleri kullanılarak çözülür.

Ayrıca Hart ve Couvillion borular için, çizgisel kaynaklar için geliştirilen zamana bağlı eşitliklere dayanan, yeni eşitlikler geliştirmiştir. Hart ve Couvillion'a göre (3.12) eşitliği  $\frac{r_\infty}{r} \geq 15$  değerleri için de kullanılabilir. Burada  $r$  boru yarıçapıdır.  $\frac{r_\infty}{r} < 15$  için  $r_\infty$  değerinin hesaplanması daha önemli hale gelmektedir. Bu gibi durumlarda  $r_\infty$ 'un hesaplanması için detaylı bir bilgi sağlanmıştır. (3.12) eşitliği  $N$  terimli bir seridir. Bu eşitliğin doğruluğu  $\frac{r_\infty}{r}$

oranının detaylı incelenmesi ile mümkündür.  $\frac{r_\infty}{r} \geq 3$  olması durumunda serinin ilk iki teriminin kullanılması önerilir. Bu oranın üçten daha küçük olması durumunda kullanılan terimlerin sayısı artırılmalıdır. Buna rağmen bu oranın üçten küçük olması durumunda kaç terimin kullanılması gerektiği sorusunun cevabı araştırılmamıştır. Görünüşe göre yazarlar bu konuyu deneysel ve saha deneyimlerini kullanarak bulmaları için sistem tasarımcılarına bırakmışlar.

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.

Borunun ısı dirençleri ve ısı taşıyıcı akışkanın taşınım direncinden oluşan toplam direncin topraktaki sıcaklık dağılımını bulmak için kullanılan eşitliklere etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Toprak ısı direnci birim boy için;

$$R_t = \frac{(T_\infty - T_0)}{Q'} \quad (3.13)$$

boru ısı direnci;

$$R_b = \frac{\ln \frac{r_d}{r_i}}{2\pi k_b} \quad (3.14)$$

ve ısı taşıyıcı akışkanın taşınım direnci;

$$R_a = \frac{1}{2h_a \pi r_i} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

- $r_d$  : Boru dış yarıçapı (m),
- $r_i$  : Boru iç yarıçapı (m),
- $k_b$  : Boru ısı iletkenliği (W/m K),
- $h_a$  : Isı taşıyıcı akışkanın taşınım ısı geçiş katsayısı (W/m<sup>2</sup> K),
- $T_0$  : Başlangıçtaki toprak sıcaklığı (°C),
- $T_\infty$  :  $r_\infty$  uzaklığındaki toprak sıcaklığı (°C)'dir.

### 3.1.3 IGSHPA Yaklaşımı

IGSPHA modeli de Kelvin çizgisel kaynak teorisi üzerine kurulmuştur. Bose (1984, 1988) toprak ısı değiştiricisi uzunluğunu yılın en sıcak ve en soğuk ayı için hesaplamış ve daha sonra mevsimlik performans ve sistem enerji tüketimini hesaplamıştır. IGSHPA yaklaşımına göre tek bir düşey tek borulu bir ısı değiştiricisi için toprak direnci şöyle tanımlanmaktadır:

$$R_t = \frac{I(X_{r_d})}{2\pi k_t} \quad (3.16)$$

$$X_{r_d} = \frac{r_d}{2\sqrt{\alpha_t t}} \quad (3.17)$$

Burada;

- $I(X_{r_d})$  : Üssel integral,
- $r_d$  : Boru dış yarıçapı (m),

$\alpha_t$  : Toprağın yayıcılığı (m<sup>2</sup>/h),  
 $k_t$  : Toprağın ısı iletkenliği (W/m K),  
 $t$  : Zaman (h)'dir.

Üssel integral  $0 < X \leq 1$  ve  $1 \leq X \leq \infty$  aralığında yaklaşık olarak verilmiştir. Buna göre,  $0 < X \leq 1$  için;

$$I(X) \approx \frac{1}{2}(-\ln X^2 - 0.57721566 + 0.99999193X^2 - 0.24991055X^4 + \dots \\ \dots 0.05519968X^6 - 0.00976004X^8) \quad (3.18)$$

ve  $1 \leq X \leq \infty$  için;

$$I(X) = \left[ \frac{1}{2X^2 e^{X^2}} \right] \frac{A}{B} \quad (3.19)$$

$$A = X^8 + 8.5733287X^6 + 18.059017X^4 + 8.637609X^2 + 0.2677737 \quad (3.20)$$

ve

$$B = X^8 + 9.5733223X^6 + 25.6329561X^4 + 21.099653X^2 + 3.9684969 \quad (3.21)$$

Yöntem biri birine yakın ısı değiştiricilerinin ısı direnç etkilerini ve toprak direncinin toplam etkisini eşdeğer bir yarıçap ile tek bir boru üzerine ekleyerek birden çok düşey ısı değiştiricisinin hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Bose'ye göre bu eşdeğer çap şöyle tanımlanmaktadır;

$$d_{eq} = \sqrt{n}(d_d) \quad (3.22)$$

Burada  $n$ , sondaj kuyusundaki toplam düşey boru sayısıdır. Tek bir U boru için  $n = 2$ 'dir.

Yeraltı oluşumunun sıcaklıkları ile en düşük ve en yüksek toprak sıcaklıkları Kusuda (1965) analitik eşitlikleri kullanılarak tahmin edilebilir. Bose (1984, 1988), yaklaşık ortalama toprak sıcaklığı, yıllık yüzey sıcaklığı salınımı ve faz sabitleri için tablo ve diyagramları da sağlamıştır. Tek bir boru için ısı geçişine borunun gösterdiği direnç aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln \frac{r_d}{r_i} \quad (3.23)$$



Düşey bir U boru için boru direnci ise

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln \frac{d_{eş}}{d_{eş} - (d_d - d_i)} \quad (3.24)$$

şeklindedir. Buradaki  $d_d$  boru dış çapı ve  $d_i$  ise boru iç çapını göstermektedir.

IGSHPA yaklaşımı en yüksek ve en düşük ısı pompası akışkan giriş sıcaklığına dayanarak yıllık ısıtma ve soğutma çalışma faktörlerini de hesaplar. Bose (1984), Cane ve Forgas'a (1991) göre en düşük giriş sıcaklığı  $T_{\min}$  verilen coğrafi konumdaki en düşük hava sıcaklığından yüksek olmak üzere  $-1.1$  °C ile  $4.4$  °C arasında ve en yüksek giriş sıcaklığı  $T_{\max}$  ise ilk yaklaşım için  $37.8$  °C olarak seçilmelidir.  $T_{\min}$  ve  $T_{\max}$ 'ın seçimine bağlı olarak toplam ısıtma ve soğutma kapasitesine ve ısıtma ve soğutmadaki etkinliğine göre ( $COP_{\text{ısıtma}}$ ,  $COP_{\text{soğutma}}$ ) bir ısı pompası seçilir. Isı değiştiricisi uzunluğunu belirlemek üzere aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

Isıtma için;

$$L_{\text{ısıtma}} = \frac{(Kapasite_{\text{ısıtma}}) \left( \frac{COP_{\text{ısıtma}} - 1}{COP_{\text{ısıtma}}} \right) (R_b + R_i \text{ÇalışmaFaktörü}_{\text{ısıtma}})}{T_{t_{\min, \text{yillik}}} - T_{\min}} \quad (3.25)$$

Soğutma için;

$$L_{\text{soğutma}} = \frac{(Kapasite_{\text{soğutma}}) \left( \frac{COP_{\text{soğutma}} - 1}{COP_{\text{soğutma}}} \right) (R_b + R_i \text{ÇalışmaFaktörü}_{\text{soğutma}})}{T_{\max} - T_{t_{\max, \text{yillik}}}} \quad (3.26)$$

$$\text{ÇalışmaFaktörü} = \frac{\text{Ortalama Isı Kaybı} / \text{Kazancı}}{\text{Cihaz Kapasitesi}} \quad (3.27)$$

IGSHPA yöntemi tüm aylara ait beklenen ısı değiştiricisi sıcaklıklarının, en sıcak ve en soğuk ay kullanılarak hesaplanan ısı değiştiricisi uzunluğunda, bilinmesini gerektirir. Isı değiştiricisindeki beklenen akışkan sıcaklığı ki bu ortalama kuyu sıcaklığına eşittir, şöyle bulunmaktadır:

- Her bir ay için ısıtma ve soğutma ihtiyacına göre uygun ısı pompası kapasitesi ve tesir katsayısı kullanılarak bir  $T_{\min}$  ve bir  $T_{\max}$  sıcaklığı kabul edilir,
- Bu  $T_{\min}$  ve  $T_{\max}$  kullanılarak ısı pompası çalışma faktörleri hesaplanır,

- (3.25) ve (3.26) eşitlikleri yardımıyla her bir ay için  $T_{t_{\min,yıllık}} - T_{\min}$  ve  $T_{\max} - T_{t_{\max,yıllık}}$  sıcaklık farkları belirlenir.
- Tahmin edilen  $T_{\min}$  ve  $T_{\max}$  değerleri ile hesaplanan  $T_{\min}$  ve  $T_{\max}$  değerleri karşılaştırılır. Aradaki farkın 0.1 °C'dan daha büyük olması durumunda  $T_{\min}$  ve  $T_{\max}$  değerleri için yeniden bir kabul yapılır ve işlemler yeterli hassasiyette sonuçlar elde edilene kadar tekrarlanır.

### 3.1.4 Kavanaugh Yaklaşımı

Kavanaugh (1985), gömülü boru etrafındaki sıcaklık dağılımı ve ısı geçişi problemine silindirik kaynak çözümünü kesin çözüm olarak yaklaşmaktadır. Çizgisel kaynak çözümü gibi silindirik kaynak çözümü de sabit yüzey sıcaklığı veya sabit ısı akısı kabulü kullanarak çözüme ulaşmaktadır.

Kavanaugh (1985) silindirik kaynak modelini 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.

Sabit ısı akısı için silindirik kaynak çözümü Carslaw ve Jaeger (1947) ile Ingersoll'un (1948, 1954) çalışmalarına dayanmaktadır.

$$T - T_0 = \frac{Q}{k_t} G(z, p) \quad (3.28)$$

Burada;

$$z = \frac{\alpha_t t}{r^2} \quad (3.4)$$

ve

$$p = \frac{r}{r_d} \quad (3.29)$$

'dir.  $r_d$  boru dış yarıçapıdır.

$G(z,p)$  ifadesi sadece zamanın ve borudan itibaren mesafenin fonksiyonu olup Carslaw ve Jaeger (1947) tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)] \frac{1}{\beta^2} d\beta \quad (3.30)$$

Kavanaugh p=1 için G(z,p) fonksiyonunun grafik sonuçlarını bulmuştur. p=1 değeri incelenmekte olan borunun yüzeyini ifade ettiğinden önem arz etmektedir. Ayrıca (3.28) ve (3.30) eşitliklerinin sabit ısı akısı için elde edildiğine dikkat etmek gerekir.

Borunun dış yüzeyi birim alanından içindeki akışkana ısı geçişi için eşdeğer ısı iletim katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h_{eş} = \left[ \frac{r_d}{r_i h_i} + \frac{r_d}{k_b} \ln \left( \frac{r_d}{r_i} \right) \right]^{-1} \quad (3.31)$$

Burada  $r_i$  boru iç yarıçapını göstermektedir. Pürüzsüz dairesel kesitli bir boru içindeki türbülanslı akış halinde taşınım ısı geçiş katsayısı şöyle tanımlanır;

$$h_i = Nu_{d_i} \frac{k_a}{d_i} \quad (3.32)$$

Nusselt sayısını belirlemek için tam gelişmiş türbülanslı akış halinde Dittus-Boelter eşitliği kullanılabilir.

$$Nu_{d_i} = 0.023 Re_{d_i}^{0.8} Pr^n \quad (3.33)$$

Isıtma için  $n=0.4$  ve soğutma için  $n=0.3$ 'tür. Boru yerleşimi Kelvin ve Ingersoll yaklaşımındaki orijinal çizgisel kaynaktan farklı olduğu için özgün çözüm Bose (1984) tarafından önerilen eşdeğer boru çapı dikkate alınarak değiştirilir. Eşdeğer boru çapı, “n” U-boru sayısını göstermek üzere;

$$d_{eş} = \sqrt{n} (d_d) \quad (3.34)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Böylece U-boru çizgisel kaynakmış gibi düşünülebilir. Birbirine yakın yerleştirilmiş yüzeylerdeki düzgün olmayan ısı akısı ve U-boru sayısı için bir düzeltme Kavanaugh tarafından sağlanmıştır. Buradaki düzeltme faktörleri C ve N deneysel çalışmalar ve andırım sonucu belirlenmektedir.

$$\Delta T_b = \frac{Q'}{CN_i 2\pi r_d h_{eş}} \quad (3.35)$$

Burada;

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

Kavanaugh (1985),  $N=2$  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;

$$T_{s,ort} = T_0 + \left[ \frac{Q'}{k_t} G(z, p) \right] + \frac{Q'}{CN_i 2\pi r_d h_{e\varphi}} \quad (3.36)$$

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

$$T_{s,\varphi} - T_{s,g} = \frac{Q'L}{m_s C_{p_s}} \quad (3.37)$$

ve

$$T_{s,ort} = \frac{T_{s,g} + T_{s,\varphi}}{2} \quad (3.38)$$

Buradan da çıkış suyu sıcaklığı elde edilir.

$$T_{s,\varphi} = \frac{Q'L}{2m_s C_{p_s}} + T_{s,ort} \quad (3.39)$$

Kavanaugh (1995) bu modeli iki test bölgesinde uygulamış ve deneysel sonuçlar elde etmiştir. Kavanaugh'a göre aşağıdaki iki şartın sağlanması durumunda bu model iyi sonuçlar vermektedir.

- Toprak özelliklerinin seçiminde gerekli özenin gösterilmesi,
- Su giriş sıcaklıklarının sistem çalıştıktan kısa bir süre sonra istenmemesi.

Tek bir U-boru'da aşağı su akışı olan boru parçası ile yukarı su akışı olan boru parçası arasında bir ısı geçişi olacaktır. Kavanaugh tek kuyudaki iki kaynağın etkileşiminin hesaplanmasına bir seçenek olarak kısa devre kayıplarını göz önüne alan tek çizgisel kaynaktan bahsetmektedir. Kavanaugh bu olayı düzeltmek için iki yöntem önermektedir. Birinci yöntem ortalama akışkan sıcaklığını kısa devre nedeniyle oluşan sıcaklık farkını hesaba katarak düzeltmektir.

$$\Delta T_{kd} = \frac{Q'_{kd} L}{m_s C_{p_s}} \quad (3.40)$$

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

$$Q'_{kd} = \frac{T_{s,g} - T_{s,\xi}}{2R_{kd}} \quad (3.41)$$

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

İkinci yöntem ise Kalman'ın (1980) çalışmalarına dayanmaktadır. Buna göre kısa devre etkisi diferansiyel bir elemandan olan ısı geçişi denkleminde uygulanmakta ve bu tüm ikili boru boyunca integre edilmektedir. Kavanaugh, bu ikinci yöntemin giriş çıkış su sıcaklık farkı 8 °C'dan küçük ve kısa devre etkisinin %10'dan daha az olduğu durumlarda kullanılmasını önermektedir.

### 3.1.5 Mukerji, Tagavi, Murphy Yaklaşımı

Mukerji vd. (1997) rasgele sarımlı gömülü borulardaki ısı geçişini kararlı hal koşulları için incelemiştir. Burada çizgisel kaynak yaklaşımından yararlanılmış ve karmaşık geometrilerdeki boru dizilişlerine uyarlanmıştır. Yöntemin tutarlılığı düz yatay boru için yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yöntemin bir kısıtlaması sadece kararlı hal koşullarını modelleyebilmesidir.

Önce çizgisel kaynak yaklaşımının düz yatay boru için çözümü elde edilmiştir. 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 (Carslaw ve Jaeger, 1959; Mukerji, 1994)

$$T(x, y, z) = T_i + \left( \frac{g_o}{4\pi k_t} \right) \left[ \left( \frac{1}{r_1} \right) - \left( \frac{1}{r_2} \right) \right] \quad (3.42)$$

Burada;

$$r_1 \equiv r_1(x, y, z) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (3.43)$$

ve

$$r_2 \equiv r_2(x, y, z) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2} \quad (3.44)$$

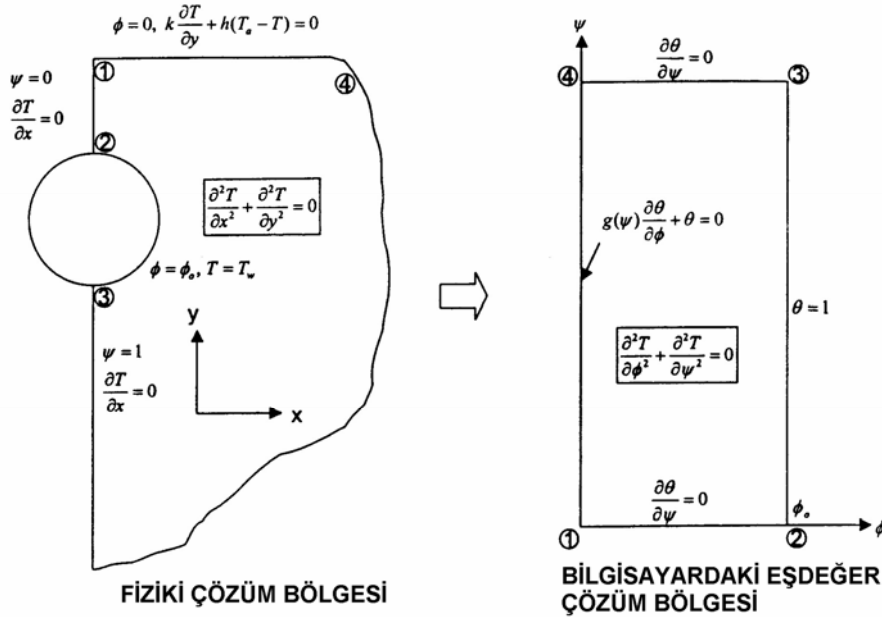
şeklinde ifade edilir. Spiral sarımlı bir çizgisel kaynak etrafındaki sıcaklık dağılımı ise yukarıdaki denklemler spiral kaynak boyunca integre edilerek,

$$T(x, y, z) - T_t = \frac{q'}{4\pi k_t} \left( \int_0^{n(2\pi)} \frac{sd\omega}{r_1} - \int_0^{n(2\pi)} \frac{sd\omega}{r_2} \right) \quad (3.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada n, tüm döngüdeki spiral sarım sayısıdır. Çizgisel kaynak yaklaşımıyla düz boru için elde edilen ifadeler ve bunların çözümlerinden elde edilen sonuçların mevcut yayınlardaki deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu belirtilmektedir. Spiral sarımlı borularda ise ısı etkileşim önemli boyutlardadır. Spiral borulardaki hatve çap oranı ısı geçiş etkinliğinde önemli rol oynamaktadır. Hesaplama kullanılan ana tasarım değerlerine göre spiral boruda birim uzunluktaki ısı akısı düz borunun sadece %25'i kadardır. Burada kullanılan çizgisel kaynak yaklaşımı (LSA) dairesel kesitli rasgele sarımlı borulara uygulanabilir.

### 3.1.6 Chung, Jung, Rangel Modeli

Sabit yüzey sıcaklığına sahip üst yüzeyinden taşınım ile ısı geçişi olan yarı sonsuz ortam içine gömülü borudaki ısı geçişi problemi yarı analitik olarak çözülmüştür.



Şekil 3.1 Denklemler ve sınır koşulları

Kararlı hal koşullarında, boru yüzeyindeki sıcaklığın değişmediği, yüzeyde taşınım ısı geçiş katsayısının sabit olduğu ve toprak özelliklerinin sabit olduğu ve toprağın derinliklerindeki sıcaklığın hava sıcaklığına eşit ve sabit olduğu kabulleri yapılmıştır. Şekil 3.1'de göz önüne alınan çözüm bölgesi, kullanılan denklemler ve sınır koşulları görülmektedir. Isı geçişi için kullanılan eşitlik Laplace denklemdir.

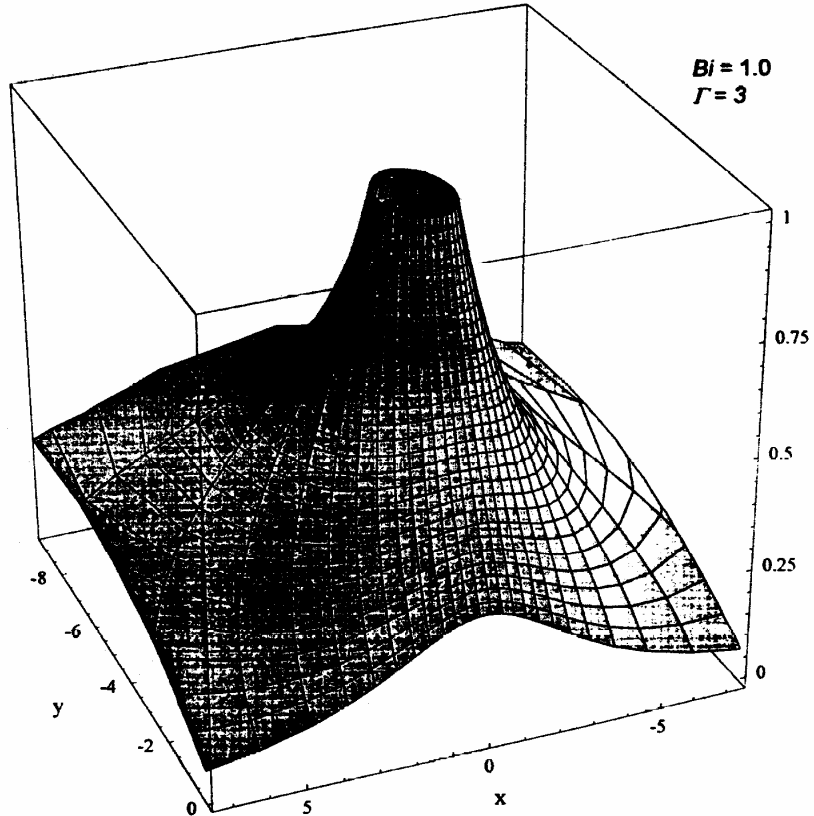
$$\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (3.46)$$

Burada  $\theta$  boyutsuz sıcaklıktır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\theta = \frac{(T - T_h)}{(T_b - T_h)} \quad (3.47)$$

Ayrıca;

$T_h$  : Ortam akışkan sıcaklığı (°C),  
 $T_b$  : Boru cidar sıcaklığı (°C)'dir.



Şekil 3.2 Katı ortamdaki sıcaklık dağılımı

Üst yüzeydeki taşınım olan ısı geçişinin hesaba dâhil edilmesi daha gerçekçi sonuç verirken

kabul edilen kararlı hal koşulları ve sabit hava sıcaklığı gerçek hayattaki koşulları yansıtmamaktadır. Topraktaki sıcaklık dağılımı Şekil 3.2’de görülmektedir. Toplam ısı akısının maksimum ısı akısına oranı incelenmiştir.

### **3.2 Toprak Isı Değiştiricilerinin Tasarımı ve Andırımı İçin Sayısal Modeller**

Önceki kısımda bahsedildiği üzere, çizgisel kaynak veya silindirik kaynak yöntemleri kullanıldığı zaman yakın borular arası ısıl etkileşimi ve boru ile toprak ara yüzeyindeki direnci hesaba katmak için bu modellerde çeşitli değişiklikler yapmak gerekmektedir. Ayrıca ele alınan sınır koşulları ve basitleştirmeler problemin çözümünde bu modellerin yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Kısa zaman aralıklarında ise ısı değiştiricisi geometrisinin de önemi ortaya çıkmaktadır. Sayısal yöntemler bu açıdan önemli avantajlara sahiptir. Karmaşık geometriler ve değişken sınır koşulları kolayca uygulanabilir. Buna karşın problem karmaşıklıklaştıkça ve uzun süreler söz konusu olduğunda daha fazla bilgisayar gücü gerekmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıda incelenecektir.

#### **3.2.1 Eskilson Modeli**

Eskilson (1987) yaklaşımı g-fonksiyonu olarak adlandırılan boyutsuz sıcaklık tepki faktörlerine dayanmaktadır. Sayısal modelde kuyu ısıl direnci ve kapasitesi ihmal edilmiş olup kuyu direnci ayrıca hesaba katılmaktadır. Model uzun zaman aralığında (25 yıla kadar) toprağın ısı akısına tepkisini bulmak amacıyla tasarlanmıştır. Fakat g-fonksiyonlarını sağlayan sayısal model kuyu geometrisini hesaba katmamıştır ve kısa zaman tepkilerini doğru bir biçimde hesaplayamaz.

#### **3.2.2 Hellstrom Modeli**

Hellstrom (1989, 1991) mevsimlik ısı depolamada kullanılan sıkı paketli toprak ısı değiştiricilerinden oluşan düşey ısı depoları için bir andırım modeli geliştirmiştir. Bu tip sistemler ısı pompası içerebilir veya içermez. Model birçok kuyudan oluşan toprak yapısını iki bölgeye ayırmaktadır. Tek bir kuyuyu çevreleyen hemen yakınındaki bölge “yerel bölge” olarak adlandırılmaktadır. Verilen bir zamanda kuyu içinde yerel ortalama sıcaklık ile ortalama akışkan sıcaklığı 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 hesaplamakta kullanılır. Uzun zaman aralıklarında bu bölgedeki ısı akış alanı zamanla değişim göstermez. İkinci bölge ise birçok kuyudan oluşan ısı deposu ile uzak bölge arasındaki ısı iletim problemiyle ilgilidir. Hellstrom bunu “küresel” problem olarak



tanımlamaktadır. Küresel problem üç bileşenden oluşur. Bunlar kararlı hal ısı kaybı bileşeni, ısı yapı bileşeni ve periyodik ısı kaybı bileşenidir. Küresel problem için kararlı hal sistemine ulaşmak, ısı depolama kapasitesi ve ısı geçiş oranına bağlı olarak, yıllarca sürebilir. Bu dönemde ise ısı akısının gitgide kararlı hale yaklaştığı geçici ısı yapı bileşeni kuyu çevresinde meydana gelir. Böylece Hellstrom modeli bir zaman adımıdaki başlangıç toprak oluşumunun sıcaklığındaki değişimi üç parçanın üst üste bindirilmesiyle ifade eder. Bunlar sözde küresel sıcaklık farkı, ısı deposu hacminin hemen yakınındaki bir bölgesel sıcaklık farkı ve bölgesel kararlı akış bölümünden olan sıcaklık farkıdır. Model, 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. Hellstrom modelinin uzun zaman aralıklarında kullanılması uygun değildir. Çünkü geometrisinden dolayı kuyu sıkı paketlidir ve yüzey alanı/hacim oranı çok küçüktür. Bunun nedeni kullanılış amacının ısıyı depolamak olmasıdır. Toprak ısı değiştiricileri çoğunlukla ısıyı depolamakta değil toprağa ısıyı atmakta kullanıldıklarından yatay kuyular birbirinden uzağa yerleştirilirler.

### 3.2.3 Thornton vd.'nin Hellstrom Modeli Uygulaması

Thornton vd. (1997) toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin detaylı bir andırımının bir parçası olarak Hellstrom modelini kullanmıştır. Model TRNSYS adlı yazılımda uygulanmıştır (Klein vd., 1996). Uzak bölge sıcaklığı ve toprak özellikleri gibi parametreler gözlemlenmiş ve bu değerler kullanılarak program ayarları yapılmıştır. Programın giriş suyu sıcaklıklarını doğru bir şekilde tahmin ettiği ifade edilmektedir.

### 3.2.4 Mei ve Emerson Modeli

Mei ve Emerson (1985) yatay borular için boru etrafındaki topraktaki donma olayını da içeren bir sayısal model geliştirmiştir. Bu yöntem borudan radyal yönde ısı geçişi, donmuş toprak bölgesi ve uzak bölgeyi tanımlayan üç adet tek boyutlu kısmi diferansiyel denklemin çözümü için açık sonlu fark yöntemini kullanmaktadır. Bu denklemler ayrıca boru boyunca ısı akışını ifade eden bir dördüncü kısmi diferansiyel denklemlerle birleştirilerek sanki iki boyutlu bir model elde edilmiştir. Model, boru cidarı ve donmuş bölge için farklı zaman adımları, akışkan ve donmamış toprak bölgesi için ise daha büyük zaman adımları kullanmaktadır. Mei ve Emerson çalışmalarında 48 günlük bir andırımın deneysel verilerle karşılaştırmasını da sunmuştur.

### 3.2.5 Muraya Modeli

Muraya (1995) ve Muraya vd. (1996) U borular arasındaki ısı etkileşimi incelemek üzere geçici rejimde iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanmıştır. Model, toprak yapısı ve özellikleri, uzak alan ve döngü sıcaklıkları, gövde boşluğu ve ısı dağıtım oranına bağlı ısı değiştiricisi etkinliğini tanımlayarak bu etkileşimin miktarını belirlemeye çalışmaktadır. Modelin geçerliliği analitik silindirik kaynak çözümünün iki farklı uygulamasına karşı sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı yaklaşımları kullanılarak sınanmıştır. Yapılan parametrik çalışmalara dayanarak kuyu geometrisine bağlı olan toplam ısıl etkinlik ve dolgu etkinliği tanımlanabilmiştir.

### 3.2.6 Rottmayer, Beckman ve Mitchell Modeli

Rottmayer, Beckman ve Mitchell (1997) açık sonlu fark yöntemine dayanan U boru ısı değiştiricileri için bir model tasarlamıştır. 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.

Rottmayer vd. yaptıkları çalışmada, analitik modelle karşılaştırıldığında, kendi modellerinin U borudan aktarılan ısıyı %5 daha az tahmin ettiğini görmüşlerdir. Bunun nedeni analitik modelde basit bir geometrinin (düz boru) kullanılmasıdır. Bunu hesaba katmak için U borularda 0.3 ila 0.5 arasında bir geometri çarpanı kullanılabilir. Bu çarpan analitik model ile bu modelin aynı kararlı hal ısı geçiş oranlarını verdiği değer olmalıdır.

### 3.2.7 Shonder ve Beck Modeli

Shonder ve Beck (1999) U boru ısı değiştiricisini tek bir eşdeğer çap ile ifade ettikleri tek boyutlu bir model geliştirmiştir. Kuyu modeli, U boruların ve ısı taşıyıcı akışkanın ısıl kapasitesini hesaba katmak için, eşdeğer çaptaki etkin tek boru çevresinde sonlu kalınlıkta bir ince film tabakasını öngörmektedir. Böylece kuyu modeli film tabakası, dolgu ve etrafındaki toprak yapısı boyunca geçen tek boyutlu geçici rejimde ısı iletimini baz almaktadır. Film tabakasının iç yüzeyinde zamanla değişen ısı akısı ve uzak radyal sınır ise bozulmamış sabit bir uzak bölge sıcaklığı kabul edilmiştir. Çözüm bölgesinin başlangıç sıcaklığı uzak bölge sıcaklığı seçilmiştir. Problem sonlu fark formülasyonu ve Crank-Nicolson çözüm yöntemi

kullanılarak çözülmüştür. Sayısal yöntem kullanılarak, toprak yapısının etkin ısıl iletkenliğini tahmin etmek için, Beck ve Amold (1977) tarafından tanımlandığı gibi, Gauss yöntemine dayanan bir parametre tahmin yöntemi tavsiye edilmektedir.

### 3.2.8 Chiasson, Spitler, Rees, Smith Modeli

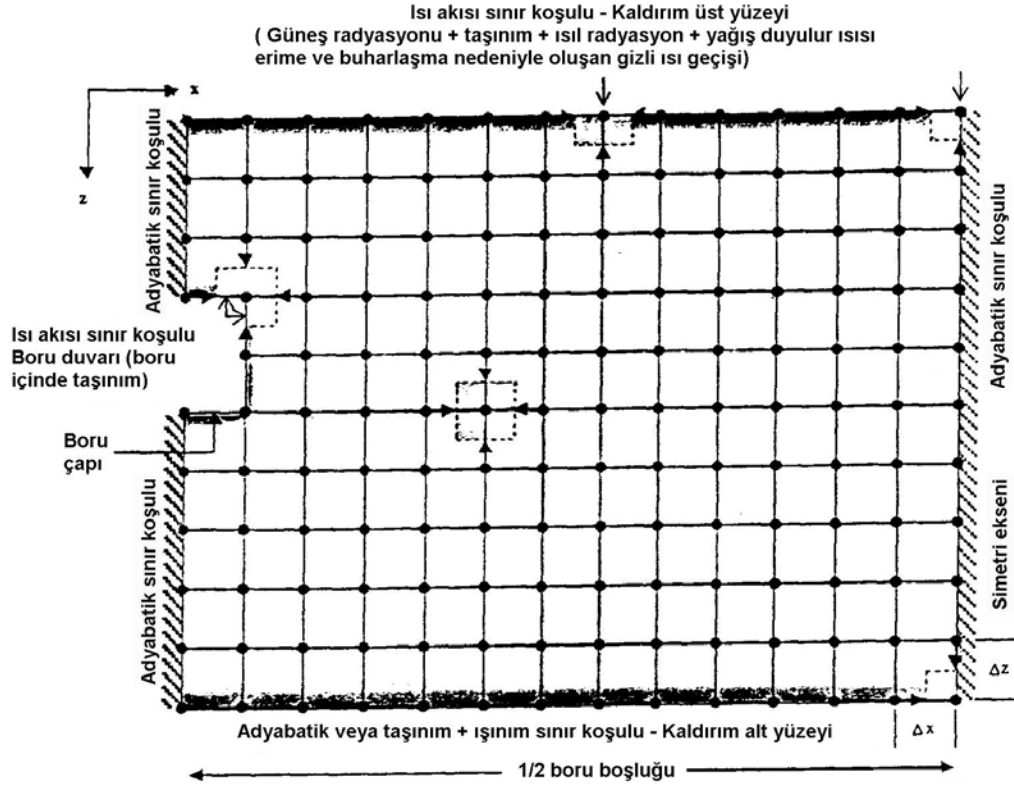
Chiasson vd. kaldırımların ısıtılması için toprak kaynaklı bir ısı pompası kullanılması durumundaki ısı geçişini incelemiştir. Burada kaldırımları ısıtmakta kullanılan sistem ısı pompası ana toprak ısı değiştiricisine yardımcı olarak kullanılmakta ve böylece sistemin ilk yatırım giderleri azalmaktadır.

İki farklı kurulum uygulanmıştır. Bunlardan birincisi spiral şekilli ısıtma sistemi diğeri ise sarmal şekilli ısıtma sistemidir. Birincisi daha çok kar eritme sistemlerinde kullanılmaktadır. Kar erimesi ile ilgili olarak temel ısı geçişi mekanizması birçok yazar tarafından belirtilmiştir (Adlam, 1950; Chapman, 1952; Kilkis, 1994; ASHRAE, 1999; Ramsey vd., 1999). Taş levha içinde iletimle ısı geçişi olmaktadır. Borudan taş levhaya olan ısı geçişi ise taşınım olmaktadır. Kaldırım üst yüzeyinde pek çok çevresel etki bulunmaktadır. Bunlar hava akımından dolayı taşınım etkisi, güneş ışınımı, ısıl (uzun dalga) ışınım, eriyen kar veya buharlaşan su nedeniyle oluşan gizli ısı değişimi ve yağış nedeniyle olan duyulur ısı değişimidir. Taş levhanın yan ve alt kısımlarındaki ısı akıları üst kısım ile karşılaştırıldığında çok büyük önem arz etmemektedir. Ancak eğer köprü altı vb. gibi alt kısmı açık yerlerde alt yüzeyden taşınım ve uzun dalga ışınım ile ısı geçişi olmaktadır.

Modelde, kaldırım taşındaki geçici rejimde ısı geçişi iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Kesit olarak taşın orta kısmından ve akış yönünde bir kesit alınmıştır ve böylece tekrarlayan bir geometri elde edilmiştir. Bu şekilde taşın hemen hemen tamamı incelenebilmiş fakat kenarlardaki etki modele dâhil edilememiştir. İki boyutlu ısı iletimi aşağıdaki biçimde ifade edilir;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.48)$$

Bu eşitlik açık sonlu fark yöntemi kullanılarak ortogonal kartezyen ızgara üzerinde ifade edilmiştir.



Şekil 3.3 Sonlu fark ızgarası ve sınır koşullarını gösteren çözüm bölgesi

Sınır koşulları ısı akısı tipi (Neumann) sınır koşullarıdır ve Şekil 3.3’de görülmektedir. Simetri ekseninde düşey sınırlarda ısı akısı sıfır kabul edilmiştir. Boru yüzeyindeki düğüm noktaları ısı taşıyıcı akışkandan taşınım ile olan ısı aktarımını göstermektedir.

Üst yüzeydeki ısı akısı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\dot{q}_{(m,l)} = \dot{q}_{güneş} + \dot{q}_{uzundalg a} + \dot{q}_{taşınım} + \dot{q}_{yağmur, kar-duyulur} + \dot{q}_{yağmur, kar-gizli} \quad (3.49)$$

Burada;

- $\dot{q}_{güneş}$  : Yüzeğe gelen güneş ışınımı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{q}_{uzundalg a}$  : Uzun dalga yayılan ışınım ( $W/m^2$ ),
- $\dot{q}_{taşınım}$  : Yüzeğe taşınım ile 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 ( $W/m^2$ )’dir.

Alt yüzey ise adyabatik yüzey olarak alınabildiği gibi köprü ve benzeri yerlerde açıkta olduğu zaman uzun dalga ışınımı ve taşınım etkileri üst yüzeye benzer şekilde ele alınabilmektedir.

(3.49)'daki her bir terim detaylı olarak incelenmiştir. Burada yüzeye gelen güneş ışınımı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$\dot{q}_{güneş} = \alpha I \quad (3.50)$$

Burada;

$\alpha$  : Yüzeyin yutuculuğu,  
 $I$  : Toplam yaygın ışınım ( $W/m^2$ )'dir.

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.

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \left( \frac{T_{(m,n)} - T_2}{2} \right)^3 \quad (3.51)$$

Burada;

$\varepsilon$  : Yüzeyin yayıcılığı,  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzman sabiti,  
 $T_{(m,n)}$  : Yüzeydeki düğüm noktası sıcaklığı (K),  
 $T_2$  : Gökyüzü sıcaklığı veya alt yüzey açıkta ise toprak sıcaklığı (K)'ni göstermektedir.

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

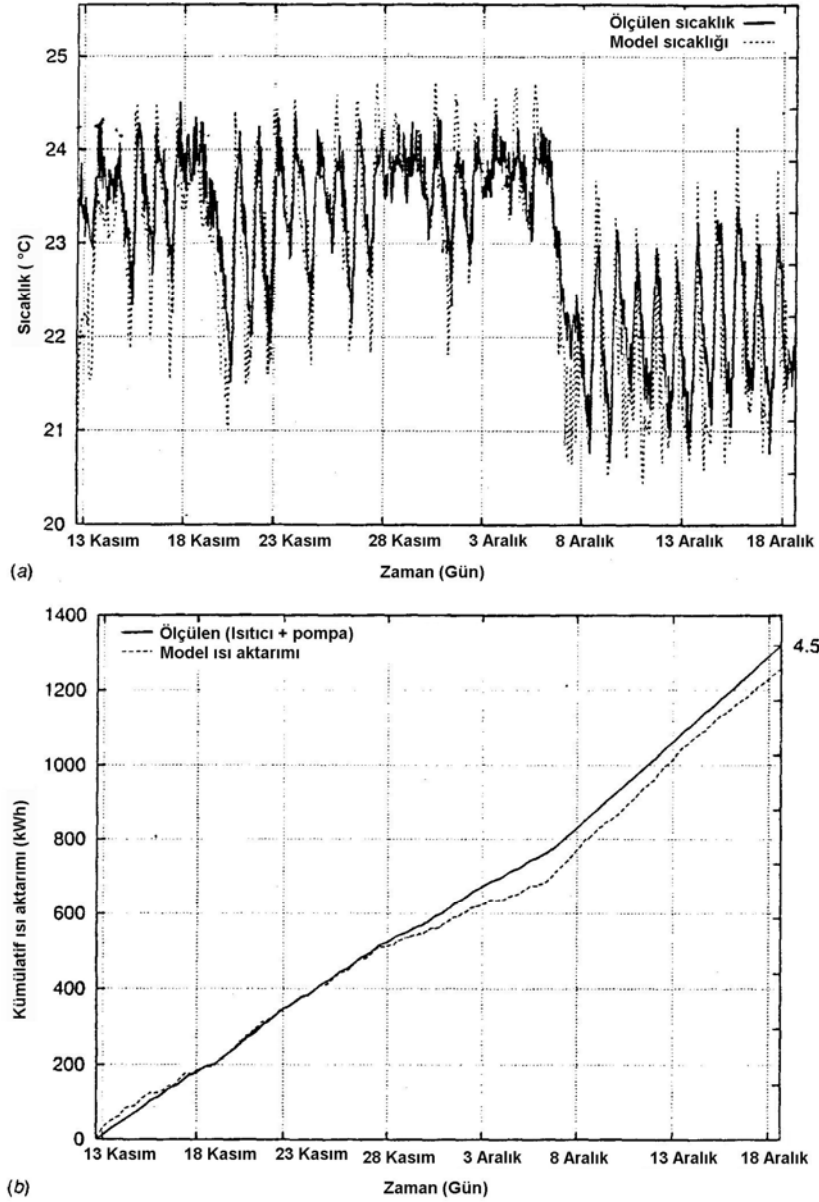
$$\dot{q}_{uzundalga} = h_r (T_2 - T_{(m,n)}) \quad (3.52)$$

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

$$\dot{q}_{taşınım} = h_c (T_{kt} - T_{(m,n)}) \quad (3.53)$$

Burada;

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



Şekil 3.4 Isı değiştiricisi akışkan dönüş sıcaklığı ve birikmiş ısı aktarımı

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;

$$\dot{q}_{yağış} = \dot{m}_{yağış} C_p (T_{kt} - T_{(m,1)}) \quad (3.54)$$

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)'dir.

Kaldırım yüzeyinden buharlaşma yoluyla oluşan ısı akısı;

$$\dot{q}_{yağış} = \dot{m}_s h_{sb} \quad (3.55)$$

ile ifade edilmiştir. Burada;

$\dot{m}_s$  : Birim zamanda birim alandan buharlaşan su miktarı (kg/s),  
 $h_{sb}$  : Suyun buharlaşma gizli ısısı ( J/kg)'dır.

Modelde gerçek meteorolojik veriler ve su giriş sıcaklıkları ve hızı girdi olarak kullanılmıştır. Modelin yeterliliği gözlemlenen ve hesaplanan su dönüş sıcaklıkları yardımıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca birikmiş ısı dağıtımı ve pompa gücü de karşılaştırılmıştır. Şekil 3.4'de bu veriler görülmektedir. 36 günlük test periyodu boyunca ölçülen ve hesaplanan birikmiş ısı dağıtımı arasındaki fark % 4.71 kadardır.

Modelin uygulanabilirliğini göstermek için TRNSYS bilgisayarlı andırım ortamında bir ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Bu modelde de deneyde kullanılan kaldırım ısı değiştiricisine benzer bir sistem kullanılmıştır. Burada, toprak ısı değiştiricisine ek olarak kullanılan kaldırım ısıtma sistemi sayesinde gerekli kuyu sayısı azaltılmış ve toprak ısı değiştiricisi boyutları küçülmüştür. Bu da ısı değiştiricisi boyutunda %35 azalmaya karşılık gelmektedir.

### 3.2.9 Piechowski Modeli

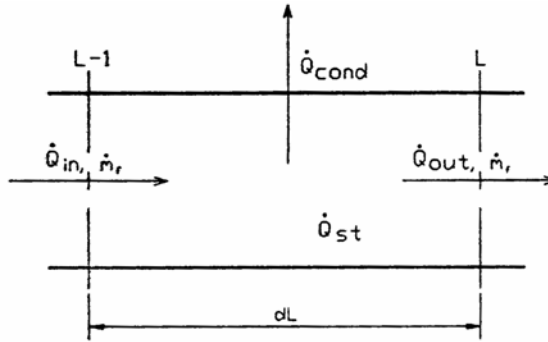
Yatay borulu toprak ısı değiştiricileri için bir model geliştirmiştir. Amaç daha az bilgisayar kapasitesi kullanarak daha doğru sonuçlar elde edebilmektir. Modelde ısı ve kütle geçişi birlikte incelenmiştir. Topraktaki kütle geçişi olayı çok karmaşık ve gelişmiş bir matematiksel model gerektirmektedir. Bu çalışmada Mei tarafından sunulan modelden bölümler içeren yeni bir model geliştirilmiştir. Modelin güvenilirliği ve hesap hızını artırmak için bazı düzenlemeler yapılmıştır. Bunu başarmak için tüm bilgisayar gücü ısı ve kütle geçişinin en önemli olduğu boru ve civarındaki olayları incelemekte kullanılmıştır.

Öncelikle soğutma çevrimi için bir toprak kaynaklı ısı pompasının çalışması modellenmiştir. Modelde uzun süreli ısı çekilmesinden dolayı oluşan boru çevresindeki donma olayı incelenmemiştir. Topraktaki ısı ve kütle geçişi mekanizmasının tüm hatlarıyla incelenmesi ve modellenmesi çok karmaşık ve zordur. Bununla beraber bazı varsayımlar yapılarak ısı pompasına akışkan giriş sıcaklığının doğru tahmin edilmesi mümkündür. Problemi daha basitleştirebilmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Toprak homojendir ve boru boyunca özellikleri değişmemektedir,

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

Topraktaki taşınım mekanizmasını tam olarak modelleyebilmek için sahada çok detaylı bir jeolojik çalışma gerekmektedir. Bu ise kurulum giderlerinin artması demektir. Ayrıca bu derece detaylı verinin bir model içerisinde kullanılması da oldukça zordur. Akışkan hızı boru içerisinde türbülanslı akış oluşturacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.5 Akışkandaki kontrol uzunluğundaki enerji dengesi

Model üç eşitlik üzerine kurulmuştur. Bunlardan biri ısı taşıyıcı akışkan için enerji dengesi ve diğer ikisi de topraktaki ısı ve kütle geçişi ile ilgilidir. Toprak ısı değiştiricisinin sonsuz küçük bir parçasındaki (Şekil 3.5) enerji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Piechowski, 1996);

$$-v \frac{\partial T_a}{\partial l} + \frac{2U_i}{r_{b,d} \rho_a c_a} \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r_{b,d}} = \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (3.56)$$

$U_i$  toplam ısı geçişi katsayısıdır. Burada boru içindeki sıcaklık dağılımı açıkça hesap edilmemiştir. Boru malzemesinin ısıl kapasitesi yeterince düşük kabul edilmiş ve bu nedenle boru cidarındaki ısı geçişi incelenmemiş, ancak toplam ısı geçiş katsayısında hesaba katılmıştır.



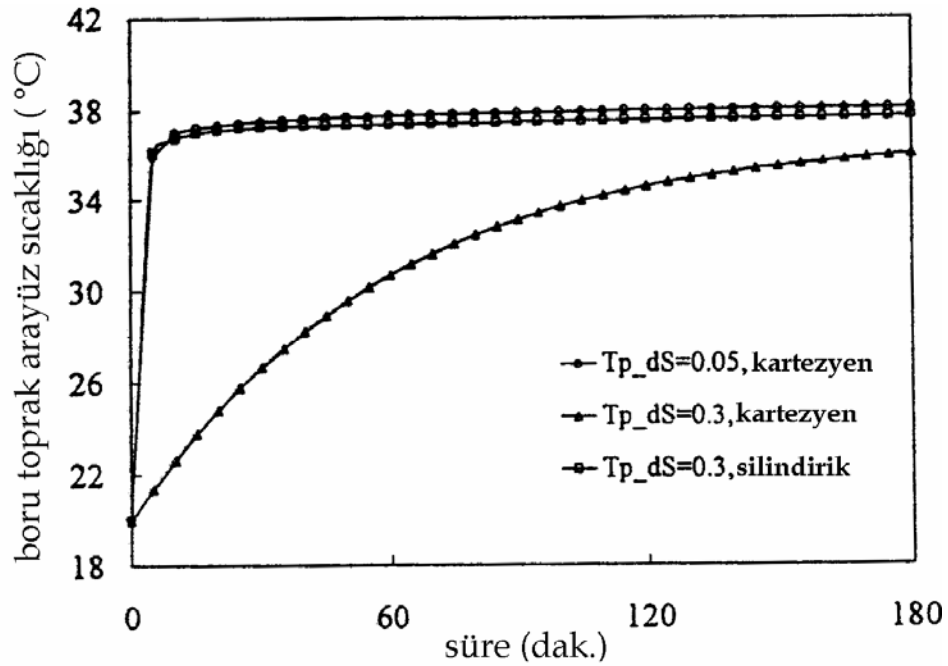
Topraktaki eşzamanlı geçici rejimdeki ısı ve kütle geçişi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla tanımlanmıştır;

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) + \nabla(D_\epsilon \nabla \theta_l) + L_\epsilon \rho_l \frac{\partial K_h}{\partial y} \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla \theta_l) + \nabla(D_T \nabla T) + \frac{\partial K_h}{\partial y} \quad (3.58)$$

Burada silindirik veya kartezyen koordinat sistemi kullanılabilir. Tek borulu düzenlemelerde silindirik koordinatlar cazip olmasına rağmen çok borulu sistemlerde kartezyen koordinat sistemi avantajlı hale gelmektedir. Ancak burada da boruyu tam dairesel olarak modelleyemediğimiz için daha çok düğüm noktası ve daha küçük ızgara aralığı kullanmak gerekeceğinden bilgisayarda andırım süresi çok uzayacaktır. Ayrıca ısı ve kütle geçişinin çok büyük bir kısmı boru civarında gerçekleştiğinden sadece bu bölgede hesaplama yapılmıştır.

Burada ısı pompasının çalışma ve durma dönemleri boyunca olan ısı geçişi incelenmiştir. Isı pompası kapatıldığında borudaki ısı taşıyıcı akışkanın etkileri ihmal edilmiştir. Şekil 3.6 ve 3.7'de topraktaki sıcaklık dağılımı ve toprak boru ara yüzündeki sıcaklık değişimi görülmektedir.



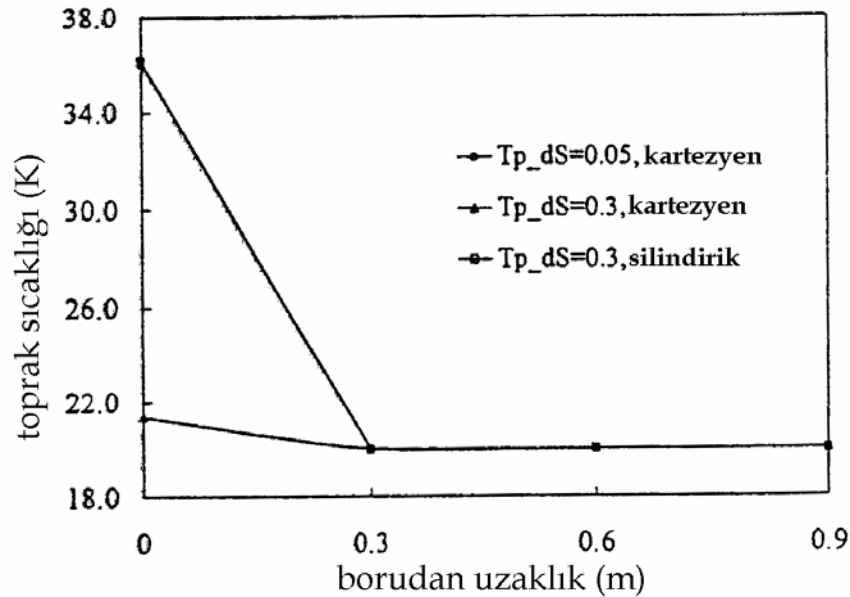
Şekil 3.6 Geçici rejimde hesaplanan sıcaklıklar

Toprak bölgesi dört düzleme ayrılmıştır. Üst düzlem toprak yüzeyidir. Geri kalan üç bölge tasarımcıya bağlıdır. Toprak kısmını küçük almak daha az bilgisayar gücü gerektirirken daha büyük toprak bölgesi daha doğru sonuç ve daha büyük bilgisayar kapasitesi demektir. Toprak içinde boru etrafında belirli bir bölgede kütle geçişi ihmal edilmiştir.

Böylece problemin çözümünde kolaylık sağlanmıştır. Bu nedenle ısı geçişi için aşağıdaki ifadeyi kullanmak mümkündür.

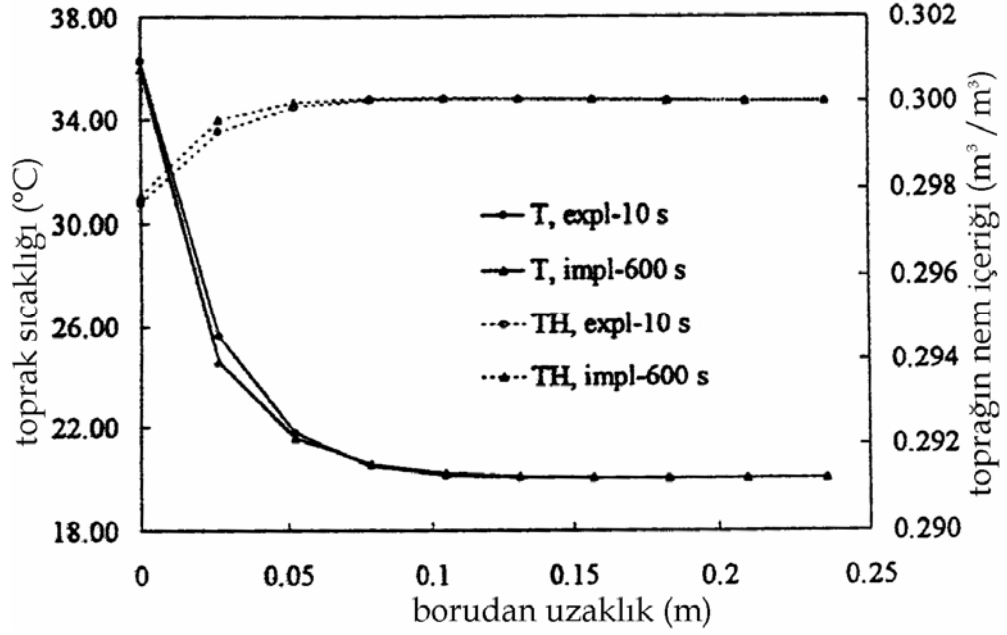
$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} \quad (3.59)$$

Bu eşitliği çözmek için her bir düzlemdeki sınır koşullarının ve topraktaki başlangıçtaki sıcaklık dağılımının bilinmesi gereklidir.

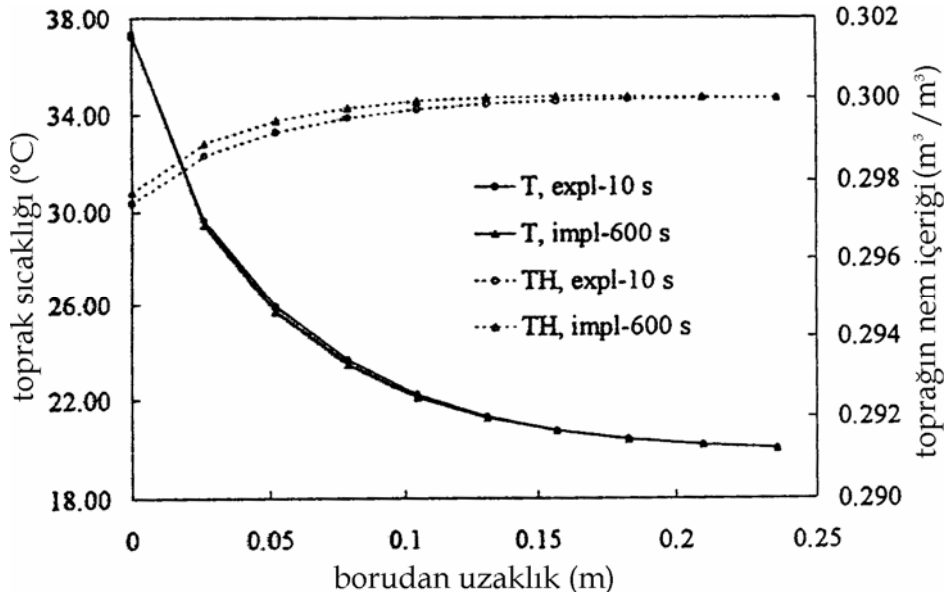


Şekil 3.7 Beş dakika sonra topraktaki sıcaklık dağılımının karşılaştırılması

Yukarıda belirtildiği gibi toprak ve havanın birleştiği ara yüzeyde sınır koşulu taşınımıdır. Denklemlerin karmaşıklığından dolayı bu problemi analitik olarak çözmek mümkün değildir. Problemin doğrusal olmamasından dolayı ısı ve kütle geçişi ifadelerini eşzamanlı çözmek için sonlu fark yönteminden yararlanılmıştır. Çözümde kapalı ve açık yöntemler kullanılmıştır. Şekil 3.8 ve 3.9'da bu iki çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.8 Başlangıçtan 10 dakika sonraki sıcaklık ve nem dağılımı



Şekil 3.9 Başlangıçtan 60 dakika sonraki sıcaklık ve nem dağılımı

Bu iki yöntem arasındaki fark çok büyük olmadığından daha büyük zaman adımlarına olanak veren kapalı formülasyon kullanılmıştır. Bu ise andırım süresine önemli miktarda etki etmektedir.

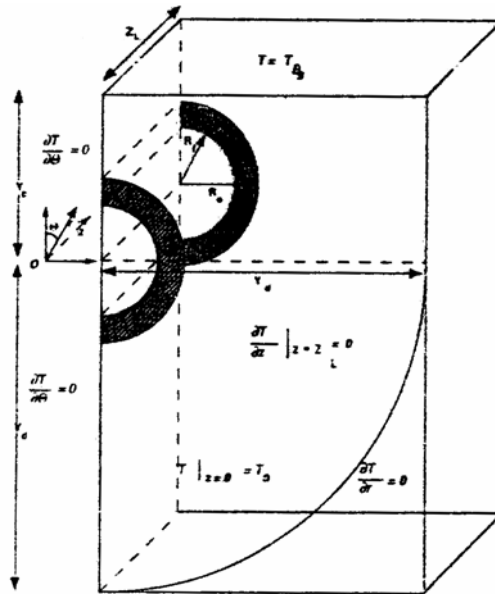
Bu yeni modelde andırım süresi azaltılmış ve daha kesin sonuçlar elde etmek mümkün olmuştur. Bunun başarılmasındaki en büyük etken bütün bilgisayar gücünü boru ve çevresindeki ısı ve kütle geçişine yoğunlaştırmaktır. Ayrıca kapalı formülasyon kullanılarak

andırım süresi önemli miktarda azaltılmıştır.

### 3.2.10 Negiz, Hastaoğlu, Heidemann Modeli

Toprağa gömülü bir boru içerisindeki akışkandan olan ısı geçişi incelenmiştir. Boru içerisindeki akış laminardır. Toprak üst yüzeyi düzgün ve sabit sıcaklıkta tutulmaktadır ve sıcaklığı topraktan ve gömülü borudan daha düşüktür. Problem üç boyutlu ve zamana bağlı olarak silindirik koordinatlarda modellenmiştir. Çözüm ADI (Değişken Yön Kapalı) yöntem kullanılarak sonlu farklar yöntemiyle çözülmüştür. Çözümün geçerliliğini sınamak için basitleştirilmiş bir problemde analitik ve sayısal çözümler karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.10'daki gibi yarı sonsuz bir ortama gömülü boru ele alınmıştır. Tüm ortamlardaki ısı geçişi geçici rejimde olmaktadır. Amaç her bir ortamdaki yani boru içerisindeki akışkan, boru cidarı ve topraktaki sıcaklık dağılımının bulmaktır.



Şekil 3.10 Yarı sonsuz ortama gömülmüş boru geometrisi

Boru içerisinde;

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_a \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.60)$$

Boru cidarında;

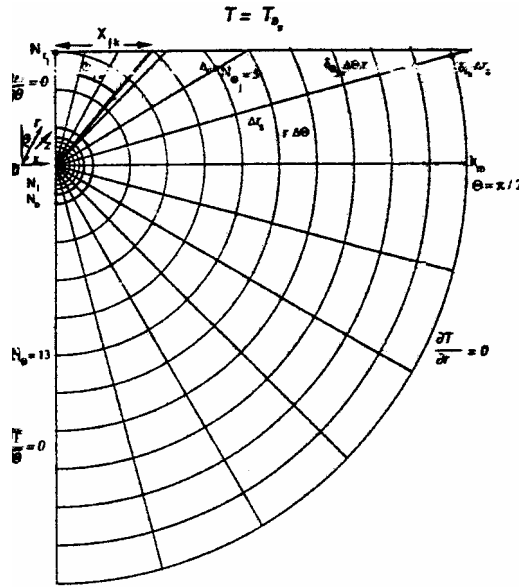
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_b \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.61)$$

Toprakta;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_t \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.62)$$

denklemleri kullanılmaktadır. Bahsedilen problemin analitik yolla çözümü mümkün olmadığından sayısal yöntemler kullanılarak çözümü araştırılmıştır. Sistemin geometrisinden dolayı sonlu fark eşitlikleri silindirik koordinatlarda yeni bir biçimde tasarlanan ızgara yapısı ile şekillendirilmiştir. Şekil 3.11’de düzensiz ızgara yapısı görülmektedir. n+1 zamanındaki sıcaklıkları elde etmek için üç aşamalı ADI yöntemi kullanılmıştır.

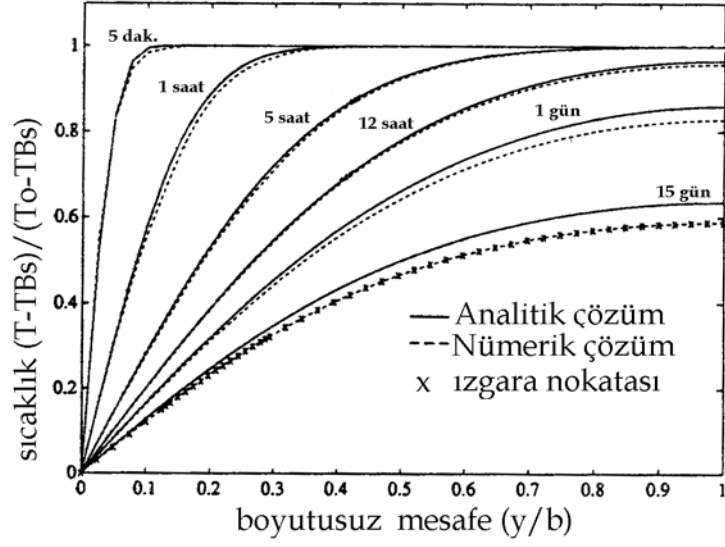
Öncelikle yöntemin doğruluğunu kontrol etmek için zaman aralıkları ve ızgara aralıkları ile çeşitli denemeler yapılarak çözümün kararlılığı sağlanmıştır. Daha sonra bu parametrelerin çözüm üzerindeki etkileri araştırılarak en uygun ızgara yapısı ve zaman aralığı seçilerek çözüm yoluna gidilmiştir. Daha sonra basitleştirilmiş bir analitik problem ile karşılaştırılarak çözümün doğruluğu kanıtlanmıştır.



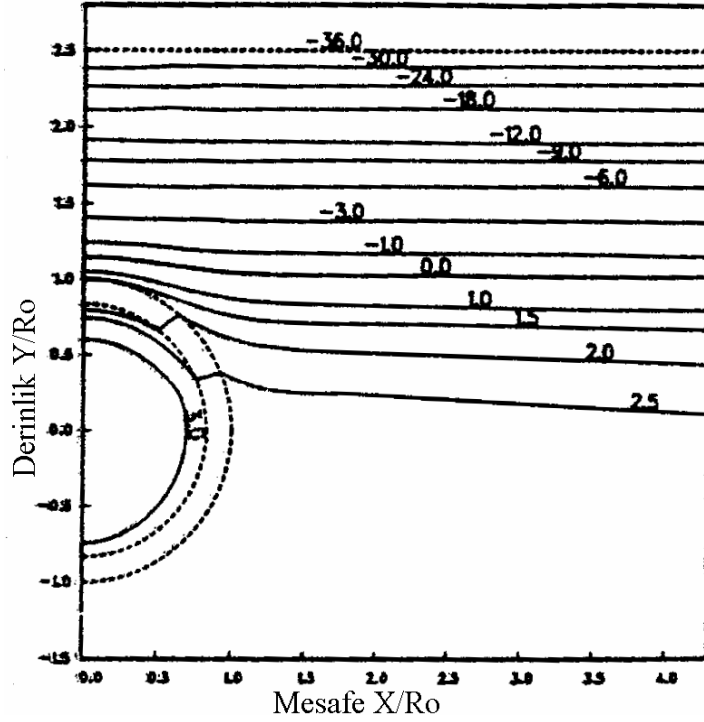
Şekil 3.11 Düzensiz ızgara yapısı: düğüm noktalarının numaralandırılması

Yapılan bir örnek çalışmada ise 0.6 m iç ve 0.72 m dış çapındaki paslanmaz çelik bir çelik boru için çözüm yapılmıştır. Boru içerisinde akışkan olarak suyun aktığı düşünülmektedir. Boru çapı oldukça büyük olmasına rağmen gömme derinliği küçük seçilmiştir. Burada andırım süresini mümkün olduğunca kısa tutmak amaçlanmıştır. Analitik ve sayısal çözümden elde edilen değerler Şekil 3.12’deki grafikte görülmektedir. Şekil 3.13 ve 3.14’de ise sayısal çözüm sonucunda elde edilen boru içindeki akışkanda, boru cidarında ve topraktaki

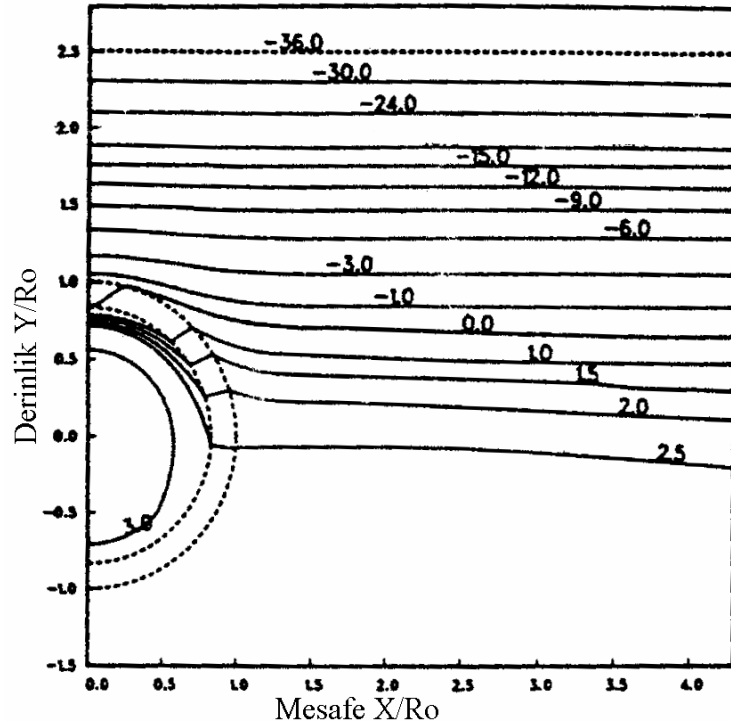
sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.12 Basitleştirilmiş problem için analitik ve sayısal çözümler



Şekil 3.13 Sabit sıcaklık eğrileri (°C),  $z/R_o=0.55$ ,  $t=16.8$  saat,  $Y_c=0.9$  m,  $N_{Re}=1100$



Şekil 3.14 Sabit sıcaklık eğrileri ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $z/R_o=3.33$ ,  $t=16.8$  saat,  $Y_c=0.9$  m,  $N_{Re}=1100$

### 3.3 Mevcut Modellerin Karşılaştırılması ve Yeni Model

Mevcut yayınlar incelendiğinde her birinin, topraktaki ısı geçişi ile ilgili problemi çözmek üzere bazı kabuller yaptığını görmekteyiz. Bu kabuller problemin çözümünü basitleştirirken gerçek hal koşullarından sapmalar göstermektedir. Pek çok modelde çizgisel kaynak modeli kullanılmakta ve boru merkezinden itibaren belli bir uzaklıkta etkilenmemiş toprak sıcaklığı tanımlanmaktadır. Bu durumda yüzey etkileri ihmal edilmektedir. Ayrıca çözümün doğru sonuçlar vermesi için uzun zaman dilimleri kullanılması gerekmektedir.

Yüzey etkilerini dikkate alan çalışmalar da mevcuttur. Ancak bu çalışmaların pek çoğunda kararlı hal koşulları için çözüm araştırılmıştır. Isı iletim denkleminin üç boyutlu çözümü ise büyük çaplı borularda araştırılmıştır. Burada ise problemin çözümünü kolaylaştırmak açısından kabul edilen sınır şartları gerçek hayat koşullarını yansıtmamaktadır.

Yüzey şartları bakımından mevcut en detaylı çalışma kaldırımıldaki kar tabakasının eritilmesi ile ilgilidir. Bu çalışmada yüzeydeki enerji dengesi verilmiş, kar tabakasının erimesi ve buharlaşması için gereken enerji hesaplanmış ve kaldırım taşındaki sıcaklık dağılımı iki boyutlu olarak elde edilmiştir.

Toprak yüzeyinde gerçekleşen olayların dinamik sınır koşulları yardımıyla ifade edilmesi ve

topraktaki sıcaklık dağılımını üç boyutlu olarak elde edilmesi ile gerçek hayat şartlarına yakın bir çözüm elde edilebilir. Bu amaçla toprak yüzeyinde gerçekleşen taşınım, ışıınım, buharlaşma ile olan ısı geçişi ve bitki örtüsü gibi tüm etkenlerin modele dâhil edilmesi gereklidir. Ayrıca başlangıç sınır koşulunun da zamana ve derinliğe bağlı olarak ifade edilmesi gereklidir. Bu sayede andırım başlangıcındaki toprak sıcaklığı dağılımı başlangıç sınır koşulu kabul edilerek daha gerçekçi bir çözüm elde edilebilir. Buradan yola çıkarak yeni bir modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bilgisayarda andırım süresini oldukça etkileyen etkilenmemiş toprak sıcaklığı ve etkilenmemiş toprak yarıçapı yerine belirli bir derinlikteki ısı akısının kullanılması ve bu sayede andırım süresinin kısaltılması amaçlanmaktadır.

Böylece andırım parametreleri değiştirilerek birkaç dakikadan tüm bir yıla kadar toprak sıcaklığı dağılımını kısa bir sürede elde etmek mümkün olacaktır.

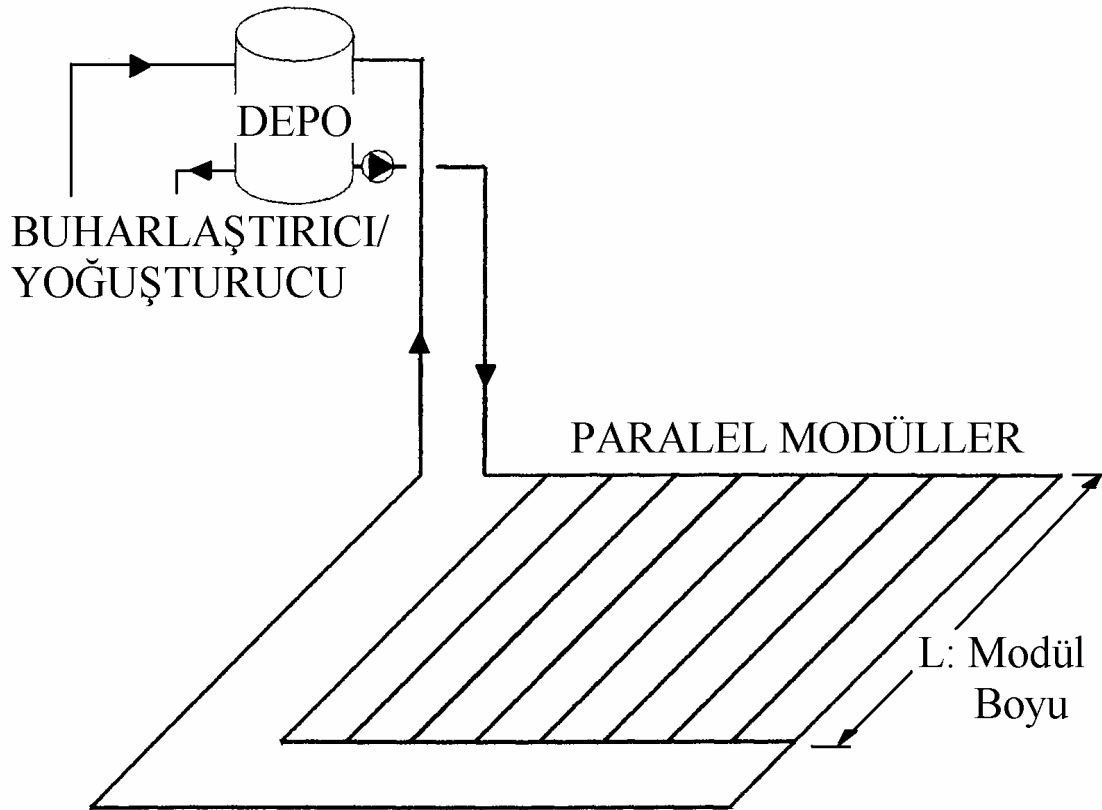


#### 4. PARALEL BORULU YATAY TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ MODELİ

Topraktaki ısı geçişi ve toprak ısı değiştiricileri için pek çok model tavsiye edilmiştir. Bunların bazıları doğrudan toprak kaynaklı ısı pompaları ile ilgili bazıları da yeraltı güç kablolarından ısı aktarımı ve bir kısmı da tarımsal uygulamalarla ilgilidir. Topraktaki ısı geçişi olayı, kütle geçişini ihmal edersek, en genel ve en geniş hali ile üç boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimi olayıdır. Isı üretimi yok iken ve kartezyen koordinatlarda genel denklem;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

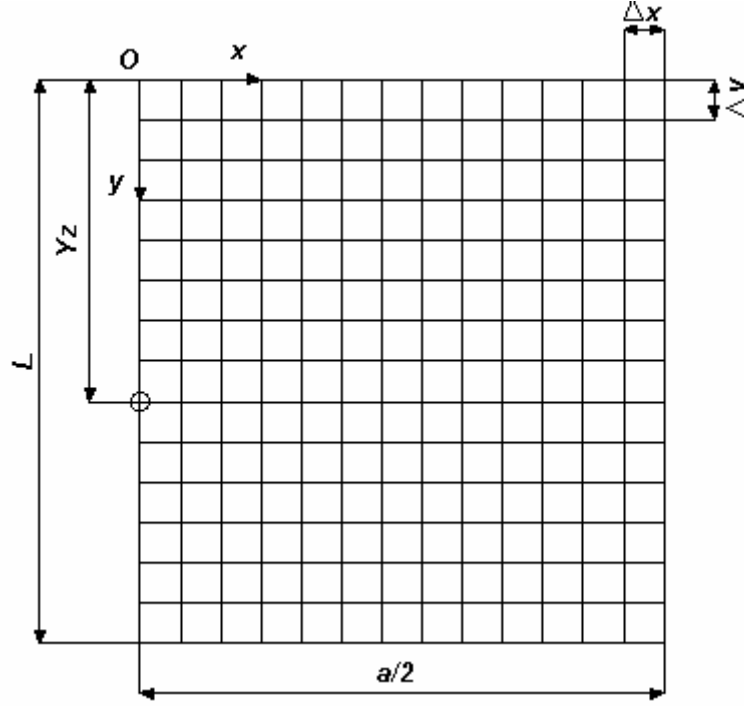
şeklinde ifade edilebilir. Toprak ısı değiştiricisi ve yakın çevresindeki topraktaki sıcaklık dağılımının bulunması için (4.1) eşitliğinin sınır koşulları yardımıyla çözülmesi gereklidir. Bu çalışmamızda kullanacağımız paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisi

Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi toprak içine gömülü, biri birlerinden belirli uzaklıkta ve





Şekil 4.3 Seçilen çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı

Şekil 4.3’de ise çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı görülmektedir. Sınır koşulları yine Şekil 4.2’deki gibidir. Yüzeyde kar örtüsü bulunması halinde kar kalınlığı ve karın ısıl özellikleri kullanılarak kar üst yüzeyinden toprak yüzeyine olan ısı geçişi de ayrıca incelenecektir. Kar örtüsü olmadığı zaman ise buna bağlı özellikler ve ısı geçişi hesaba katılmayacaktır.

#### 4.1 Problemin Tanımı

Şekil 4.1’de görülen paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisi modellenmiş ve Şekil 4.2’deki gibi bir çözüm bölgesi için iki boyutlu ısı iletimi denkleminin çözümü araştırılmıştır. Burada aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Borular çukur içerisinde tek sıra halinde ve aynı derinlikte gömülüdür,
- Boru çapı çok küçük olduğundan boru içerisindeki akışkanın sıcaklığı boru eksenine dik bir kesitte her noktada aynıdır,
- Çözüm bölgesi göz önüne alınırken gidiş ve dönüş kolektörlerinin paralel boru sistemine etkisi ihmal edilmiştir,
- Her bir paralel boruda akan suyun debisi biri birine eşittir,
- Toprağın ısıl özellikleri (ısı yayıcılık, ısı iletim katsayısı vb.) her noktada aynıdır ve yönden bağımsızdır,

- Topraktaki kütle geçişi ve bunun etkisiyle oluşan ısı geçişi göz önüne alınmamıştır,
- Boru malzemesi ve özellikleri her noktada aynıdır.

Toprak içerisinde iki boyutlu ve zamana bağlı ısı geçişi için (4.2) eşitliği kullanılmıştır. Çözüm bölgesi için sınır koşullarını aşağıdaki gibi ifade edilebiliriz.

$$T_0 = T(x, t) \quad , t = 0 \quad (4.3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0 \quad (4.4)$$

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

$$Q(W / m^2) \quad , y = L \quad (4.6)$$

$$Q_{top}(W / m^2) \quad , y = 0 \quad (4.7)$$

$$T_{a,g} = sb. \quad (4.8)$$

(4.4) ve (4.5) numaralı eşitlikler simetri eksenini ve tekrarlanan geometrinin bir sonucudur.  $y=L$  için  $Q(W/m^2)$  ısı akısının bilinmesi halinde çözümde kullanılacak düşey yöndeki düğüm sayısı azalacağından bilgisayardaki andırım süresi de önemli miktarda azalacaktır. Örneğin 3 m derinlikteki ısı akısının bilinmesi durumunda düğüm noktaları arası mesafenin 0.1 m olması halinde düşeyde 301 düğüm noktası kullanılırken yaklaşık 10 m derinlikte  $Q=0$  alınması halinde 1001 düğüm noktası kullanılması gerekir. Bunun sonucunda andırım süresi oldukça değişmektedir. Popiel vd. (2001) yaptıkları çalışmada bu ısı akısını Fourier denklemi ile ifade etmektedir;

$$q = -k_t \frac{dT}{dx} \quad (4.9)$$

Burada;

$k_t$  : Toprağın ısı iletim katsayısı (W/m K),

$\frac{dT}{dx}$  : Verilen derinlikteki sıcaklıktaki değişim miktarıdır.

Ayrıca (4.8)'de boru içerisinde akan akışkanın giriş sıcaklığının zamanla değişmediğini göstermektedir. Başlangıç koşulu olan (4.3) eşitliği ve üst yüzey sınır koşulu (4.7) eşitliği daha detaylı olarak ayrıca incelenecektir. Başlangıç koşulu için toprak sıcaklığının yıl

boyunca değişiminin derinliğe bağlı olarak bilinmesi gereklidir.

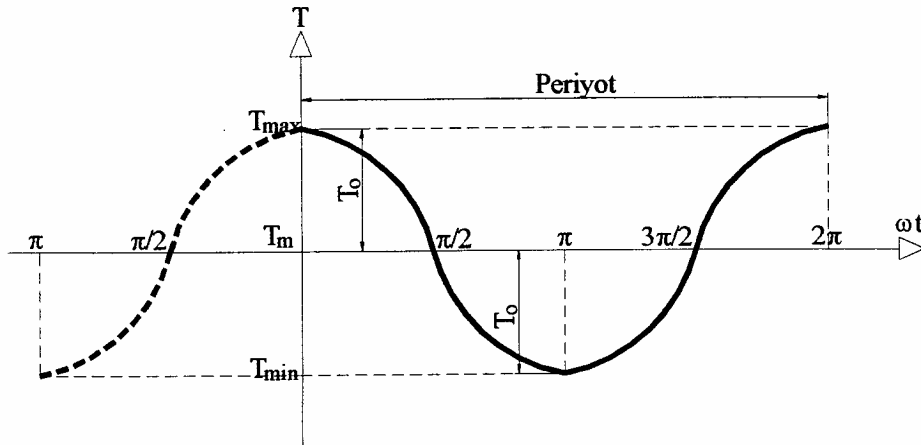
#### 4.1.1 Toprak Sıcaklığının Zamana ve Derinliğe Bağlı Olarak Hesaplanması

Isı kaynağı ve kuyusu olarak kullanılacak toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin bilinmesi için kartezyen koordinatlarda tek boyutlu periyodik ısı geçişini incelememiz gerekir. Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin belirlenebilmesi için toprak yüzeyindeki yıllık ve aylık sıcaklık değişimlerinin de bilinmesi gerekir. Yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişimini deneysel olarak ölçümü yapan kuruluştan (meteoroloji) elde edebilmek mümkün olduğu gibi Penny ve Edwards'a (1996) göre bulunulan bölgenin hava sıcaklıkları kayıtlarından da faydalanmak mümkündür. Gerek meteorolojideki yüzey sıcaklıkları verilerinden, gerek hava kayıtlarından toprak sıcaklığının yaz ortasında bir maksimum ve kış ortasında bir minimum değere haiz olduğu ve zamana bağlı sıcaklık değişiminin sinüs veya kosinüs dalgalanmalarına çok yakın bir seyir izlediği görülmektedir. Dolayısıyla toprak sıcaklığının belirli bir derinlikte zamanla periyodik olarak değiştiiğini kabul etmek mümkündür. Buradan yola çıkarak toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişimini matematiksel olarak ifade etmek için yüzeydeki toprak sıcaklığı değişimini şöyle ifade edebiliriz;

$$T(0,t) = T_{t,ort} + T_{t,gen} \cos(\omega t) \quad (4.10)$$

Burada;

- $T_{t,ort}$  : Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{t,gen}$  : Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\omega$  : Açısal hız (rad)'dır.  
 $t$  : Zaman (s)



Şekil 4.4 Matematiksel olarak öngörülen toprak yüzey sıcaklığı değişimi

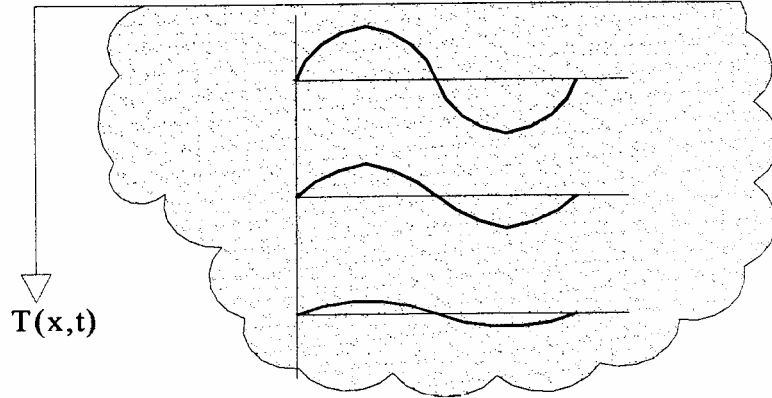
Denklem (4.10)'da t yerine sıfır girildiğinde yüzeydeki toprak sıcaklığının maksimum değeri elde edilir. Şekil 4.4'te bu değişim görülmektedir. Isı geçişinin kartezyen koordinatlarda tek boyutlu, yüzeye dik yönde ve ortamda herhangi bir ısı iletimi olmadığı düşünülürse, çözümümüze temel oluşturan ısı iletim denklemi aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.11)$$

Şekil 4.5'te toprak sıcaklığı değişiminin derinliğin artması ile azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla her derinlikte ayrı  $T_{t,gen}$  değerinden söz edilmelidir. Buradan yola çıkarak sıcaklık dalgalanmalarının derinlikle ilişkisini gösteren bir ifadenin çözüm olarak sunulan denklemde yer alması gereklidir. Bu durumda (4.11) eşitliğinin çözümü aşağıdaki gibi olacaktır (Penny ve Edwards, 1996);

$$T(x, t) = T_{t,ort} + T_{t,gen} e^{-x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_t}}} \cos \left( \omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_t}} \right) \quad (4.12)$$

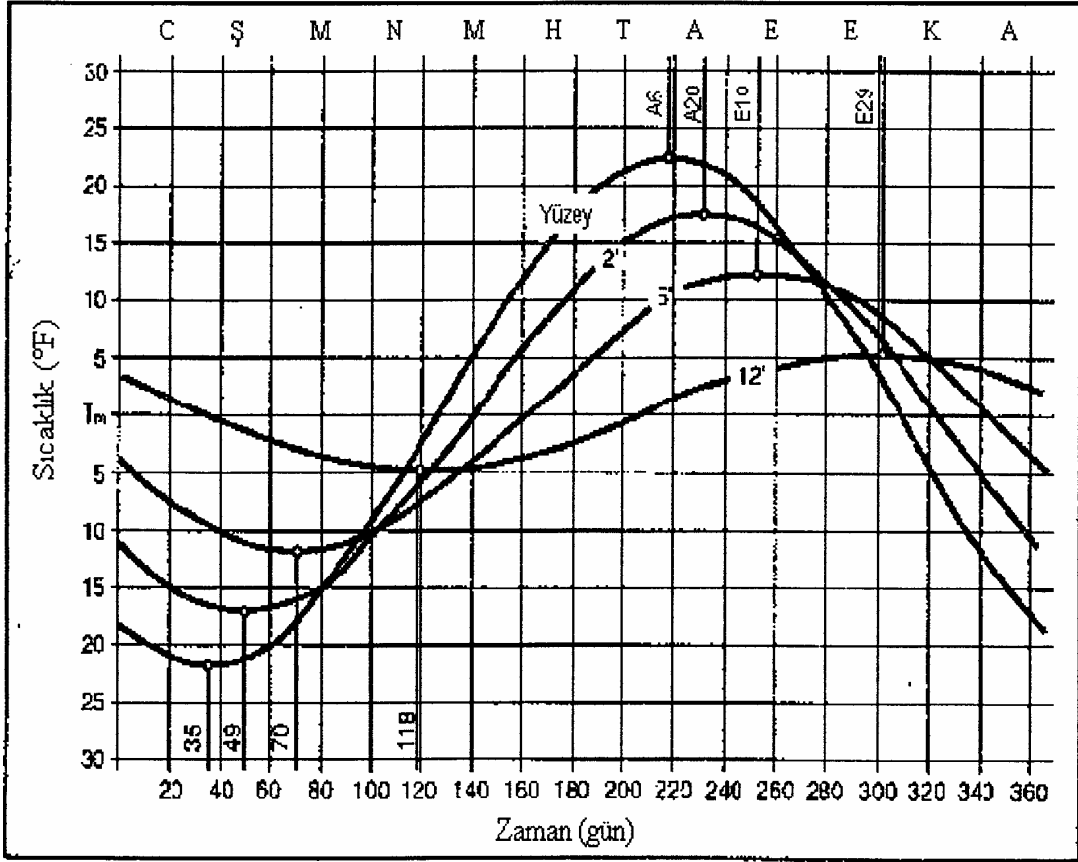
Şekil 4.5'te toprak sıcaklığındaki değişimin derinliğin artmasıyla azaldığı ve belli bir derinlikte  $T_{t,gen}$  genliğinin sıfıra eşit olduğu ve toprak sıcaklığının  $T_{t,ort}$  değerinde sabit kaldığı söylenebilir. Bu derinlikte toprak sıcaklığı dış etkenlerden etkilenmemektedir. Bunun nedeni üst yüzeydeki değişimlerin o derinliğe ulaşması için gereken süreden daha kısa zamanda gerçekleşmesidir.



Şekil 4.5 Toprak sıcaklığındaki değişimin derinlikle ilişkisi

(4.12) eşitliği yardımıyla sadece yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişiminin bilinmesi ile toprağın herhangi bir derinlik ve herhangi bir zamandaki sıcaklığını hesaplamak mümkündür. Şekil 4.6'de ABD'de bir eyalete ait toprak sıcaklığının maksimum olduğu

zamanın derinliğe bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 4.6 Toprak sıcaklığı salınımı (Diz, 2001)

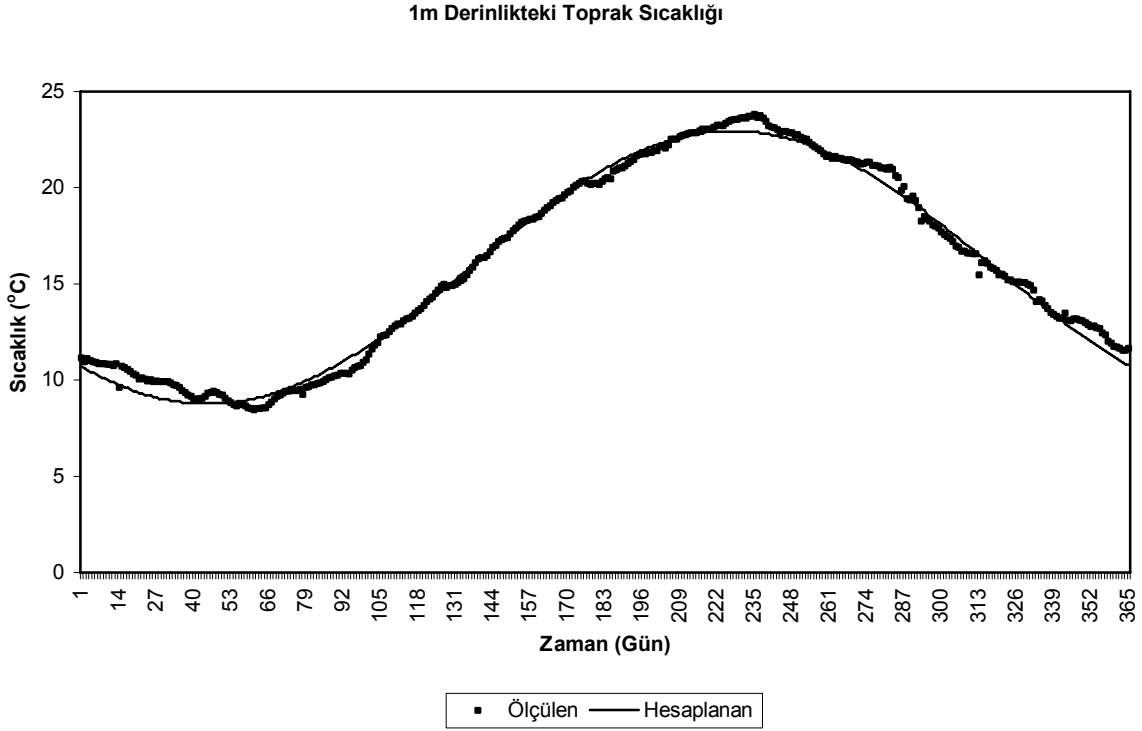
Derinlik arttıkça maksimum toprak sıcaklıklarına daha geç ulaşılmaktadır. Bu gecikme yüzeyde meydana gelen sıcaklık dalgalanmalarının belirli bir hızda toprak içerisine yayılması sonucu oluşur. (4.12) eşitliğinde bu faz farkı göz önüne alınır ve  $\omega$  ifadesi açık olarak yazılırsa eşitliğimiz (4.13)'deki hale gelir;

$$T(x, t) = T_{t,ort} + T_{t,gen} e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}}} \cos \left( 2\pi \frac{t}{P} - x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}} \right) \quad (4.13)$$

Burada;

- $T_{t,ort}$  : Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $T_{t,gen}$  : Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $x$  : Gömme derinliği (m),
- $t$  : Periyot başlangıcından itibaren süre (s),
- $P$  : Periyot (s),
- $\alpha_t$  : Toprağın ısı yayıcılığı ( $\text{m}^2/\text{s}$ )'dir.

Şekil 4.7’de İstanbul Göztepe için bu yolla hesaplanan ve meteorolojiden elde edilen ölçümlerin karşılaştırılması yapılmaktadır. Burada 1 m derinlikteki toprak sıcaklıkları yine meteorolojiden alınan 10 yıllık ortalama yüzey sıcaklıkları kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 Hesaplanan ve ölçülen toprak sıcaklıkları (İstanbul-Göztepe)

Hesaplamalarda  $T_{t,ort} = 15.85$  °C,  $T_{t,gen} = 10.4$  °C,  $\alpha_t = 0.00000068$  m<sup>2</sup>/s ve periyot başlangıcı olarak da 24 Temmuz kabul edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda hesaplanan değerlerdeki hata miktarının  $\pm 1$  °C olduğu görülmüştür. Ayrıca derinliğin artması sonucu toprak sıcaklığındaki salınım miktarı azalacağından yapılan hesaplardaki hata miktarının daha da az olacağı söylenebilir.

#### 4.1.2 Yüzeydeki Enerji Dengesi

Toprak üst yüzeyi için enerji dengesi kurulurken üst yüzeyin maruz kaldığı tüm koşullar göz önüne alınmıştır. Bunlar; rüzgâr dolayısıyla oluşan taşınım ısı geçişi, gelen güneş ışınımı ve uzun dalga ışınım, buharlaşma nedeniyle oluşan gizli ısı değişimi, yağmur ve karla taşınan ısı, toprak üzerindeki karın erimesi sonucu oluşan ısı geçişi ve yüzeyden yayılan uzun dalga ışınımdır. Bütün bu sayılanlara ek olarak göz önünde bulundurulması gereken bir diğer etken de yüzeyin geometrisi ve yüzeydeki bitki örtüsüdür. Modelde tüm bu faktörlerin etkisi hesaplamalara dâhil edilmiştir. Bunların modelde kullanılabilmesi için çok detaylı ve yeterli



miktarda veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzeydeki enerji dengesi eşitliği üst yüzeydeki ısı akısını hesaplamakta kullanılmaktadır. Buna göre;

$$\dot{Q}_{top} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E + \dot{Q}_H + \dot{Q}_{LE} + \dot{Q}_{LI} + \dot{Q}_{SI} + \dot{Q}_P \quad (4.14)$$

olacaktır. Burada;

- $\dot{Q}_{top}$  : Yüzeydeki toplam ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_C$  : Yüzeydeki kar örtüsünden geçen iletimsel ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_E$  : Yüzeydeki buharlaşma nedeniyle oluşan gizli ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_H$  : Yüzeyden taşınım ile olan duyulur ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_{LE}$  : Yüzeyden yayılan uzun dalga ışıınımı ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_{LI}$  : Yüzeye gelen uzun dalga ışıınımı ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_{SI}$  : Yüzeye gelen güneş ışıınımı ısı akısı ( $W/m^2$ ),
- $\dot{Q}_P$  : Yüzeyde yağış nedeniyle oluşan ısı akısı ( $W/m^2$ )'dir.

Yüzeydeki enerji dengesi yaklaşımı üst yüzey sınır koşullarını belirlemek için en uygun yöntemdir (Miller, 1979).

#### 4.1.2.1 Toprak Üst Yüzeyinde Taşınım ile Olan Duyulur Isı Geçişi

Yüzeydeki duyulur ısı akısı Price ve Dunne (1976) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\dot{Q}_H = \rho_h C_p D_h \zeta (T_h - T_y) \quad (4.15)$$

$$D_h = \frac{\kappa^2 U_z}{(\ln(z/z_0))^2} \quad (4.16)$$

$$\zeta = \frac{1}{(1 + 10 Ri)} \quad (4.17)$$

ve

$$Ri = \frac{gz(T_h - T_y)}{T_h U_z^2} \quad (4.18)$$

Burada;

- $\rho_h$  : Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),
- $C_p$  : Havanın sabit basınçta özgül ısısı ( $J/kg K$ ),
- $D_h$  : Duyulur ısı değişim katsayısı ( $m/s$ ),
- $\zeta$  : Kararlılık fonksiyonu (boyutsuz),

$T_h$	: Hava sıcaklığı (K),
$T_y$	: Toprak veya kar örtüsünün üst yüzey sıcaklığı (K),
$\kappa$	: Von Karman sabiti (boyutsuz),
$U_z$	: Yüzeyden z kadar yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s),
$z$	: Referans yüksekliği (m),
$z_0$	: Pürüz yüksekliği (m),
$Ri$	: Richardson sayısı (boyutsuz),
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )'dir.

#### 4.1.2.2 Yüzeyden Buharlaşma Nedeniyle Oluşan Gizli Isı

Üst yüzeyde buharlaşma nedeniyle oluşan gizli ısı akısı iki şekilde oluşmaktadır. Birincisi yüzeyde kar örtüsü varsa bundan dolayı karın süblimasyonu nedeniyle oluşan gizli ısı akısıdır ve Price ve Dunne (1976) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\dot{Q}_E = \rho_h L_s D_e \zeta \left( 0.622 \frac{e_h - e_y}{P_h} \right) \quad (4.19)$$

$$D_e = \frac{\kappa^2 U_z}{(\ln(z/z_0))^2} \quad (4.20)$$

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

$$Ri = \frac{gz(T_h - T_y)}{T_h U_z^2} \quad (4.22)$$

ve

$$\log_{10} e_h = 11.40 - \frac{2353}{T_{\zeta n}} \quad (4.23)$$

Burada;

$\rho_h$	: Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),
$L_s$	: Kar örtüsünün süblimasyon gizli ısısı (J/kg),
$D_e$	: Gizli ısı değişim katsayısı (m/s),
$\zeta$	: Kararlılık fonksiyonu (boyutsuz),
$T_h$	: Hava sıcaklığı (K),
$T_y$	: Toprak veya kar örtüsünün üst yüzey sıcaklığı (K),
$\kappa$	: Von Karman sabiti (boyutsuz),
$U_z$	: Yüzeyden z kadar yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s),
$z$	: Referans yüksekliği (m),
$z_0$	: Pürüz yüksekliği (m),
$Ri$	: Richardson sayısı (boyutsuz),
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),

$e_h$  : Kısmi buhar basıncı (Pa),  
 $e_y$  : Yüzeydeki doymuş buhar basıncı (Pa),  
 $P_h$  : Atmosfer basıncı (Pa),  
 $T_{\text{çn}}$  : Günlük çiğ noktası sıcaklığı (K),

Eğer yüzeyde kar örtüsü varsa sadece bu bileşen olacaktır. İkincisi ise yüzeyin karla kaplı olmadığı hallerde yüzeydeki buhar basıncı ile havanın buhar basıncı arasındaki farktan dolayı oluşan gizli ısı akısıdır. Yüzeyden buharlaşma nedeniyle oluşan gizli ısı akısı Penman (1963) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_E = F(u)(P_y - P_h) \quad (4.24)$$

Burada;

$F(u)$  : Rüzgâr hızının bir fonksiyonu,  
 $P_y$  : Yüzey sıcaklığındaki doymuş buhar basıncı (Pa),  
 $P_h$  : Kısmi buhar basıncı (Pa)'dır.

Buradaki  $F(u)$  fonksiyonu aşağıdaki gibi ampirik şekilde hesaplanabilir;

$$F(u) = 0.0168h_y \quad (4.25)$$

Doymuş buhar basıncı tablolardan veya aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir;

$$P_y = 103T + 609 \quad 263K \leq T \leq 303K \quad (4.26)$$

Penman (1963) tüm bunları kullanarak yüzeyden buharlaşma nedeniyle oluşan ısı akısını aşağıdaki gibi ifade etmektedir;

$$\dot{Q}_E = 0.0168fh_y \left[ (aT_y + b) - r_h (aT_h + b) \right] \quad (4.27)$$

$f$  : Yüzey örtüsü ve toprak nemine bağlı bir katsayı (boyutsuz)'dır.  
 $T_h$  : Hava sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_y$  : Toprak yüzey sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $h_y$  : Taşınım ısı geçişi katsayısı ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$ ),  
 $r_h$  : Havanın bağıl nemidir.

Hesaplamalarda  $f$  katsayısı aşağıdaki gibi seçilir:

Üzerinde bitki örtüsü bulunmayan topraklarda;

- Doymuş toprak  $f=1$

- Nemli toprak  $f=0.6-0.8$
- Kuru toprak  $f=0.4-0.5$
- Çorak toprak  $f=0.1-0.2$  alınabilir.

Üzeri çimle örtülü topraklarda  $f$  katsayısı yukarıdaki değerlerin 0.7 ile çarpılması sonucu elde edilir.

#### 4.1.2.3 Toprak Üst Yüzeyine Gelen Güneş Işınımı

Toprak üst yüzeyi tarafından yutulan kısa dalga güneş ışınımı aşağıdaki eşitlik yardımıyla ifade edilebilir (Kreith ve Bohn, 1993);

$$\dot{Q}_{SI} = bS \quad (4.28)$$

Burada;

- $b$  : Yüzeyin yutuculuğu ve aydınlatılmasına bağlı bir katsayı,  
 $S$  : Toprak üst yüzeyine gelen güneş ışınımı ( $W/m^2$ )'dir.

Tam aydınlatılmış yüzeyler için  $b$  katsayısı şöyledir;

$$b = 1 - albedo \quad (4.29)$$

Albedo (Dağılım Kırılma Sabitesi) yüzeyin yansıtıcılığı ile ilgili bir terimdir. Toprak üst yüzeyi tarafından yutulan güneş ışınımı Fourier analizi ve birinci harmonik fonksiyon kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Cinquemani vd., 1979);

$$\dot{Q}_{SI} = b \{ S_{ort} + S_{gen} \operatorname{Re}(\exp(i\omega t + \varphi_1)) \} \quad (4.30)$$

Burada;

- $S_{ort}$  : Yüzeydeki ortalama yıllık güneş enerjisi ( $W/m^2$ ),  
 $S_{gen}$  : Yıllık güneş ışınımındaki salınımın genliği ( $W/m^2$ ),  
 $\varphi_1$  : Faz farkı (rad)'dir.

Güneş ışınımının hesaplarda kullanılması için bilinmesi gereken bir diğer değer de gün uzunluğudur. Gün uzunluğu güneşin doğuşu ile batışı arasındaki süredir (Timlin vd., 2001). Bu iki zamanda da güneş diskinin %50'si ufku altındadır.

#### 4.1.2.4 Gün Uzunluğunun Hesaplanması

Gün uzunluğunun hesaplanması için coğrafi bölgeye ait enlem, boylam ve deniz seviyesinden yüksekliğinin bilinmesi gereklidir. Ayrıca coğrafi konumun hangi zaman dilimi içinde

bulunduğunun da bilinmesi gereklidir.

Buna göre güneşin doğuşu ve batışını hesaplırsak arada kalan zaman bize gün uzunluğunu verecektir. Güneşin doğuşu ve batışı ile ilgili bilgiler çok çeşitli kaynaklarda yer almaktadır. NASA ve pek çok İslami astronomi kaynaklarında bununla ilgili hesaplama yöntemleri verilmektedir. Güneşin doğuşu ve batışını saat ve dakika olarak bulmak için aşağıdaki eşitliklerden yararlanabiliriz (Ahmed, 1996). Güneşin doğuşu için;

$$GD = Z - U \quad (4.31)$$

ve güneşin batışı için;

$$GB = Z + U \quad (4.32)$$

eşitliklerini kullanabiliriz.

$$Z = 12 + \frac{(R-L)}{15} + \frac{T}{60} \quad (4.33)$$

$$U = \frac{1}{15} \arccos \left( \frac{[\sin(-0.8333 - 0.0347(H)^{0.5})] - \sin D \sin B}{\cos D \cos B} \right) \quad (4.34)$$

Burada;

- GD : Güneşin doğuşu (saat dakika),
- GB : Güneşin batışı (saat dakika),
- B : Coğrafi konumun enlemi,
- L : Coğrafi konumun boylamı,
- R : Referans boylam (Zaman dilimi\*15),
- H : Deniz seviyesinden yükseklik (m),
- D : Güneşin eğim açısı,
- T : Zaman eşitliği (Equation of Time)'dir.

$$T = 3.98892[(\varepsilon - \beta) + (\lambda - \nu)] \quad (4.35)$$

$$\lambda = 0.985653(N - 2) \quad (4.36)$$

$$\nu = \lambda + 1.915169 \sin \lambda \quad (4.37)$$

$$\varepsilon = 0.985653(N - 80) \quad (4.38)$$

$\varepsilon \geq 270$  için  $\varepsilon$ 'den 360 çıkarılır

$\varepsilon \geq 90$  için  $\varepsilon$ 'den 180 çıkarılır

$$\beta = \arctan(0.917408 \tan \varepsilon) \quad (4.39)$$

$$D = \arcsin(0.398 \sin(\nu - 78.75)) \quad (4.40)$$

#### 4.1.2.5 Yüzeiden Yayılan Uzun Dalga Işınımı

$T_{s0}$  sıcaklığındaki toprak üst yüzeyinden yayılan uzun dalga ışınımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\dot{Q}_{LE} = -\varepsilon\sigma T_y^4 \quad (4.41)$$

Burada;

- $\varepsilon$  : Yüzeyin yayıcılığı (boyutsuz),  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann sabiti ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ),  
 $T_y$  : Toprak üst yüzey sıcaklığı (K)'dir.

#### 4.1.2.6 Yüze Gelen Uzun Dalga Işınımı

Yüze gelen uzun dalga ışınımı ampirik ifadelerle verilmiştir (Satterlund, 1979; Fleagle ve Businger, 1980).

$$\dot{Q}_{LI} = 1.08(1 - \exp\left(-\left(0.01e_h\right)^{\frac{T_h}{2016}}\right)\sigma T_h^4 \quad (4.42)$$

$$\log_{10} e_h = 11.40 - \frac{2353}{T_{\zeta n}} \quad (4.43)$$

Burada;

- $e_h$  : Kısmi buhar basıncı (Pa),  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann sabiti ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ),  
 $T_h$  : Günlük ortalama hava sıcaklığı (K),  
 $T_{\zeta n}$  : Günlük çığ noktası sıcaklığı (K)'dir.

#### 4.1.2.7 Yüzeydeki Kar Örtüsünden İletimle Olan Isı Geçişi

Kar örtüsünden ve toprak üst tabakasından iletimle geçen ısı şu şekilde tanımlanmıştır (Liston ve Hall, 1995):

$$\dot{Q}_C = -(T_y - T_{t,alt}) \left( \frac{z_{kar}}{k_{kar}} + \frac{z_{t,\üst}}{k_{t,\üst}} \right)^{-1} \quad (4.44)$$

Burada;

$T_{t,alt}$	: Toprağın üst tabakasının altındaki sıcaklık (K),
$Z_{kar}$	: Kar örtüsünün kalınlığı (m),
$Z_{t,üst}$	: Toprak üst tabakasının kalınlığı (m),
$k_{kar}$	: Kar örtüsünün ısı iletkenliği (W/m K),
$k_{t,üst}$	: Toprak üst tabakasının ısı iletkenliği (W/m K)'dir.

Burada unutulmaması gereken en önemli nokta yüzeyde kar örtüsü olduğunda yukarıda anlatılan ışınlama ile ilgili kısımların bu kar örtüsünün özelliklerine göre yeniden düzenlenmesi gereğidir. Örneğin yüzeyin yansıtıcılığı ve yayıcılığı değişeceğinden toprak yüzeyi yerine hesaplamalarda kar örtüsünün özellikleri kullanılmalıdır.

#### 4.1.2.8 Yağış Nedeniyle Oluşan Isı Akısı

Yağış nedeniyle oluşan ısı akısı  $Q_p$ , yağışın yoğunluğu ve yağmur veya kar sıcaklığına göre hesaplanabilir (Timlin vd., 2001). Burada yağmur veya kar sıcaklığı yaklaşık olarak hava sıcaklığında alınabilir (Timlin vd., 2001).

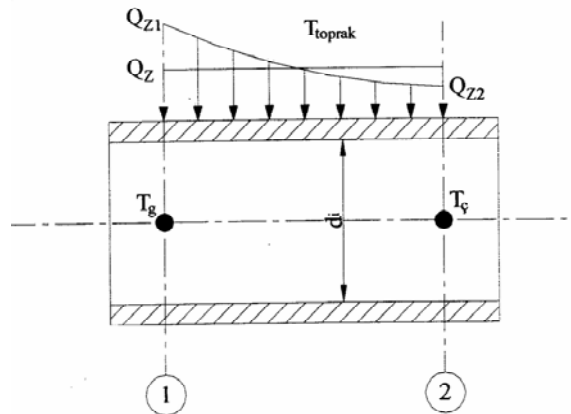
$$\dot{Q}_p = I_R C_{P_s} (T_h - T_y) \quad (4.45)$$

Burada;

$I_R$	: Yağış yoğunluğu ( $kg/m^2 s$ ),
$C_{P_s}$	: Suyun özgül ısısı ( $J/kg K$ ),
$T_h$	: Hava sıcaklığı (K),
$T_y$	: Toprak üst yüzeyi sıcaklığı (K)'dir.

#### 4.1.3 Boru Boyunca Akışkan Sıcaklığının Değişimi

Sürekli rejimde boru içerisindeki sıcaklık değişimini incelersek Şekil 4.8'de görüldüğü gibi bir değişim görülecektir.



Şekil 4.8 Boru boyunca meydana gelen ısı geçişi

Boru içerisindeki akışkan sıcaklığındaki değişim enerjinin korunumu yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_{a,g\zeta} = T_{a,\zeta} - T_{a,g} = \frac{q}{mC_{p_a}} l \Rightarrow dT_{a,g\zeta} = \frac{q}{mC_{p_a}} dl \quad (4.46)$$

Isı geçişinin nedeni toprak sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki farktır. Yani akışkan sıcaklığındaki artma toprak sıcaklığında azalmaya yol açmaktadır.

$$T = T_t - T_a \quad (4.47)$$

Bu durumda;

$$dT = -dT_{a,g\zeta} \quad (4.48)$$

şeklinde yazılabilir. Birim boydan aktarılan ısı miktarı ise;

$$q = k_t(T_t - T_a)F(z) = k_tTF(z) \quad (4.49)$$

olacaktır. Bu ifade (4.46)'da yerine yazılırsa;

$$dT_{a,g\zeta} = \frac{k_tTF(z)}{\dot{m}_a C_{p_a}} dl = -dT \quad (4.50)$$

Yukarıdaki ifade düzenlenir,

$$\int_{T_{a,g}}^{T_{a,\zeta}} -\frac{dT}{T} = \frac{k_t F(z)}{\dot{m}_a C_{p_a}} \int_0^L dl \quad (4.51)$$

ve integre edilirse aşağıdaki (4.52) eşitliği elde edilir.

$$T_{a,\zeta} = T_t - (T_t - T_{a,g}) e^{\frac{-k_t F(z)L}{\dot{m}_a C_{p_a}}} \quad (4.52)$$

$$z = \frac{\alpha_t t}{r^2} \quad (4.53)$$

$$F(z) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-z\beta^2}}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} \frac{d\beta}{\beta} \quad (4.54)$$

Burada;

$T_{a,\zeta}$  : Akışkanın çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{a,g}$  : Akışkanın giriş sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),



- $T_t$  : Toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $L$  : Boru boyu (m),  
 $k_t$  : Toprağın ısı iletkenliği (W/m K),  
 $\dot{m}_a$  : Akışkanın kütleli debisi (kg/s),  
 $C_{p_a}$  : Akışkanın özgül ısısı (J/kg K),  
 $\beta$  : İntegral değişkeni,  
 $F(z)$  : Toprak ısı yayıcılığı, boru çapı ve zaman faktörünü içeren integral'dir.

Bu ifade yardımıyla  $dl$  uzunluğundaki boru parçaları için giriş ve çıkış sıcaklıklarını bulabiliriz. Bir parçadan çıkan suyun sıcaklığı diğer boru parçasına giren suyun sıcaklığı olacaktır. Bu şekilde problemimizi iki boyutlu ardı ardına birçok çözüm bölgesinden oluşan üç boyutlu bir model haline getirebiliriz.

$$T_{a,\zeta} = T_t - (T_t - T_{a,g}) e^{\frac{-k_t L}{\dot{m}_a C_{p_a}}} \quad (4.55)$$

(4.55) ifadesinin (4.52) ifadesinden farkı  $F(z)$  terimini içermemesidir.  $F(z)$  terimi zamanla toprakta oluşacak sıcaklık değişiminden dolayı birim boydan aktarılan ısıdaki düşüşü öngörmektedir. Buradaki  $k_t$  birim boy toprak ısı iletkenliğidir.

## 5. PROBLEMİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde çözüm bölgesinde geçerli denklem sistemlerinin sayısal olarak çözümü ele alınacaktır. Sınır şartları ve denklemlerin karmaşıklığı nedeniyle analitik bir çözüm yöntemi geliştirilememektedir. Sayısal çözüm yöntemleri arasında başlıca iki yöntem öne çıkmaktadır. Bunlar sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleridir. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık geometrilere sonlu farklar yöntemine göre önemli ölçüde esneklik sağlar. Bununla beraber bu metod daha karmaşık notasyon içerir ve daha fazla bilgisayar kapasitesi gerektirir. Bu nedenle problemin çözümünde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu farklar yönteminin formülasyonu basittir ve mühendislik problemlerinde karşılaşılan kısmi diferansiyel denklemlere kolaylıkla uygulanabilir.

### 5.1 Çok Boyutlu Zaman Bağlı Isı İletimi

Çok boyutlu ısı iletimi probleminin çözümünde açık, kapalı, Crank-Nicholson veya birleşik yöntemlerden herhangi biri kullanılabilir. Açık formülasyonda üç boyutlu zamana bağlı ısı iletimi problemini göz önüne alırsak, burada, sistemin çözümünün kararlı bir yapıda olması için kullanabileceğimiz zaman aralığı daha küçük olacak ve andırım için gereken süre daha uzun olacaktır. Ayrıca her bir doğrultuda  $N$  düğüm noktasından oluşan bir sistemde  $N^3 \times N^3$  matrisin her bir zaman adımı için çözülmesi gerekecek ve büyük  $N$  sayılarında bu çok da kolay olmayacaktır.

Bu tip zorlukların önüne geçmek için Değişken Yön Kapalı (ADI) formülasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin avantajı zaman adımını daha büyük seçebilmemizdir. Çözüm her zaman adımı ve ızgara aralığı için karardır. Ayrıca neticede elde edilen matris sistemi tridiagonal matris'tir ve çözümü Thomas algoritması kullanılarak kolaylıkla bulunabilir.

### 5.2 İki Boyutlu Zamana Bağlı Isı İletimi ve ADI Yöntemi Uygulaması

Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimi denkleminin çözümünü sonlu farklar yöntemini uygulayarak bulmaya çalışalım. Yöntemin asıl avantajı her bir zaman adımında çözülmesi gereken tek bir matris yerine daha küçük boyutlardaki matrisin defalarca çözülmesidir. Boyutları daha küçük olan matris daha az bilgisayar hafızası ve daha az işlem gücü gerektirdiğinden düğüm noktası sayısı fazla olan sistemlerde büyük avantaj sağlamaktadır. Aşağıda verilen zamana bağlı ısı iletimi denklemini ele alırsak;

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5.1)$$

ve

$$T(x, y, t) = T(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) \equiv T_{i,j}^n \quad (5.2)$$

şeklinde gösterebiliriz.

(5.1)'deki diferansiyel denklemin ADI yöntemi kullanılarak çözümü aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

n zamanından n+1 zamanına geçişte yönlerden birinde, örneğin x yönü, kapalı formülasyon, diğerinde ise, örneğin y yönü, açık formülasyon kullanılır. Sonraki aşamada ise yani n+1 zamanından n+2 zamanına geçişte bu işlem tersine gerçekleşir. Yani bu sefer x yönü için açık formülasyon ve y yönü için kapalı formülasyon kullanılır. Hesaplama işlemi böylece yönlerin her bir zaman adımında değiştirilmesi ile devam eder ve en sonunda istenilen N zamanına ulaşılır. (5.1) eşitliğini ADI yöntemi kullanarak n zamanından n+1 zamanına geçişte ve x yönünde kapalı ve y yönünde açık formülasyon kullanarak yazarsak;

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{(\Delta y)^2} \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Bir sonraki adımda x yönünde açık formülasyon ve y yönünde ise kapalı formülasyon kullanılacaktır. Böylece n+1 zamanından n+2 zamanına geçişte (5.1) eşitliği aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\frac{T_{i,j}^{n+2} - T_{i,j}^{n+1}}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+2} - 2T_{i,j}^{n+2} + T_{i,j+1}^{n+2}}{(\Delta y)^2} \quad (5.4)$$

Bu denklem n+1 zamanında hesaplanan değerleri kullanarak n+2 zamanındaki sıcaklıkları hesaplar. Bilgisayar uygulamalarında kolaylık sağlaması bakımından (5.3) ve (5.4) numaralı eşitlikler bilinenler eşitliğin bir yanda bilinmeyenler diğer yanında olacak şekilde düzenlenirse n+1 zamanı için;

$$-r_x T_{i-1,j}^{n+1} + (1 + 2r_x) T_{i,j}^{n+1} - r_x T_{i+1,j}^{n+1} = r_y T_{i,j-1}^n + (1 - 2r_y) T_{i,j}^n + r_y T_{i,j+1}^n \quad (5.5)$$

ve n+2 zamanı için;

$$-r_y T_{i,j-1}^{n+2} + (1 + 2r_y) T_{i,j}^{n+2} - r_y T_{i,j+1}^{n+2} = r_x T_{i-1,j}^{n+1} + (1 - 2r_x) T_{i,j}^{n+1} + r_x T_{i+1,j}^{n+1} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

$$r_x = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad \text{ve} \quad r_y = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} \quad (5.7)$$

Problemin çözümünde (5.5) ve (5.6) numaralı eşitlikler istenilen zamana ulaşılan kadar tekrarlanarak çözülür. Bu yöntemin tam kapalı veya Crank-Nicholson yöntemine göre en büyük avantajı tridiagonal olmasıdır. Bu matris sistemi ise Thomas Algoritması kullanılarak çözülebilir.

Önceki bölümde tanımlanan sınır koşullarının sonlu fark ifadeleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dT}{dx} = 0 \quad (5.8)$$

ifadesi için merkezi farklarda;

$$\frac{T_{i-1,j} - T_{i+1,j}}{2\Delta x} = 0 \quad (5.9)$$

yazılabilir ve buradan da;

$$T_{i-1,j} = T_{i+1,j} \quad (5.10)$$

bulunur.

Sınırdaki bilinen ısı akısı olması durumunda ise;

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (5.11)$$

ifadesi merkezi farklarda;

$$q = -k \frac{T_{i-1,j} - T_{i+1,j}}{2\Delta x} \quad (5.12)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan da;

$$T_{i+1,j} = T_{i-1,j} - \frac{2q\Delta x}{k} \quad (5.13)$$

bulunur.

Yüzeyde taşınım sınır koşulu olması durumunda;

$$-k \frac{dT}{dx} = h(T_\infty - T) \quad (5.14)$$

ifadesi merkezi farklarda;

$$-k \frac{T_{i-1,j} - T_{i+1,j}}{2\Delta x} = h(T_\infty - T_{i,j}) \quad (5.15)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan da;

$$T_{i-1,j} = T_{i+1,j} + \frac{2\Delta x h}{k} (T_\infty - T_{i,j}) \quad (5.16)$$

bulunur.

### 5.3 Thomas Algoritması

Thomas algoritması tridiagonal matris sistemlerinin çözümü için en uygun yöntemdir. Aşağıdaki gibi bir denklem sisteminin çözümü bu yöntemle bulunabilir.

$$\left. \begin{aligned} b_1 u_1 + c_1 u_2 + 0 + \dots + 0 &= d_1 \\ a_2 u_1 + b_2 u_2 + c_2 u_3 + 0 + \dots + 0 &= d_2 \\ 0 + \dots + a_i u_{i-1} + b_i u_i + c_i u_{i+1} + 0 + \dots + 0 &= d_i \\ 0 + \dots + a_{R-2} u_{R-3} + b_{R-2} u_{R-2} + c_{R-2} u_{R-1} &= d_{R-2} \\ 0 + \dots + 0 + a_{R-1} u_{R-2} + b_{R-1} u_{R-1} &= d_{R-1} \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Bu yöntem bilgisayar ortamında çok etkili bir şekilde kullanılabilir ve oldukça kararlı bir yapıya sahiptir. Çözüm için;

$$a_i u_{i-1} + b_i u_i + c_i u_{i+1} = d_i \quad (5.18)$$

$1 \leq i \leq R$  ve  $a_1 = c_R = 0$  denklem sistemini göz önüne alalım. Thomas Algoritması ile çözümünü araştırırsak önce;

$$\beta_i = b_i - \frac{a_i c_{i-1}}{\beta_{i-1}}, \quad \beta_1 = b_1 \quad (5.19)$$

ve

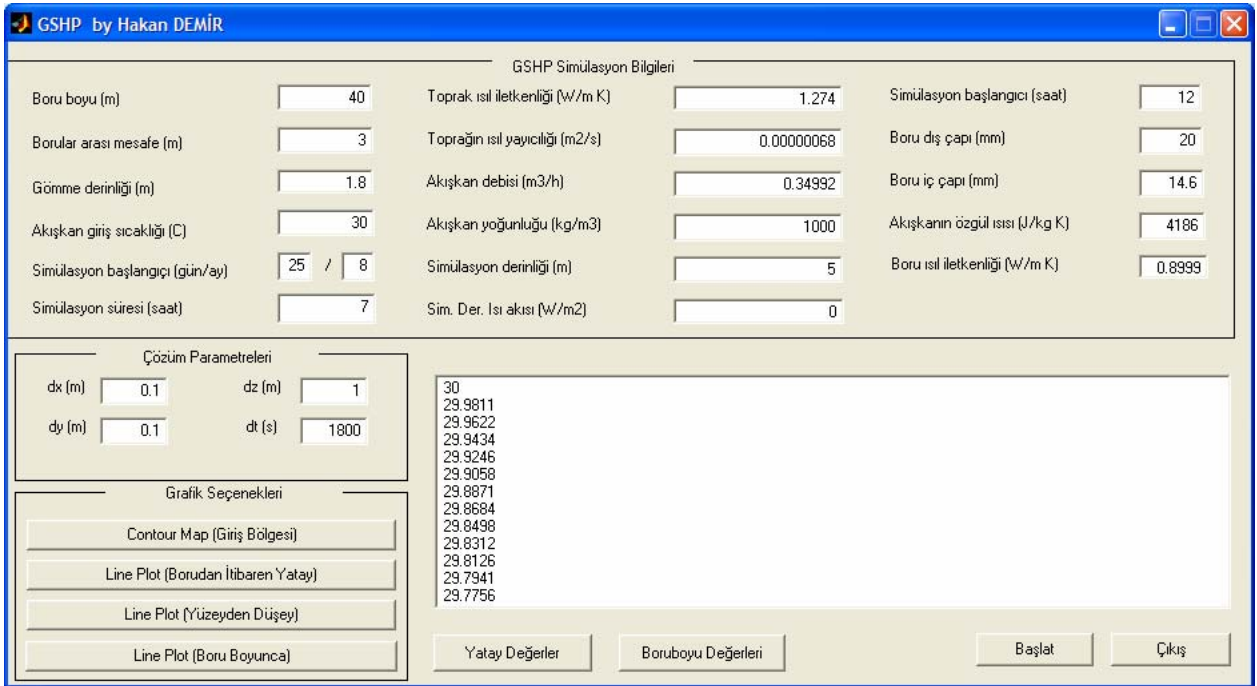
$$\gamma_i = \frac{d_i - a_i \gamma_{i-1}}{\beta_i}, \quad \gamma_1 = \frac{d_1}{b_1} \quad (5.20)$$

eşitlikleri çözülür. Daha sonra bağımlı değişkenler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$u_R = \gamma_R \text{ ve } u_i = \gamma_i - \frac{c_i u_{i+1}}{\beta_i} \quad (5.21)$$

#### 5.4 MATLAB Ortamında Problemin Modellenmesi ve Çözümü

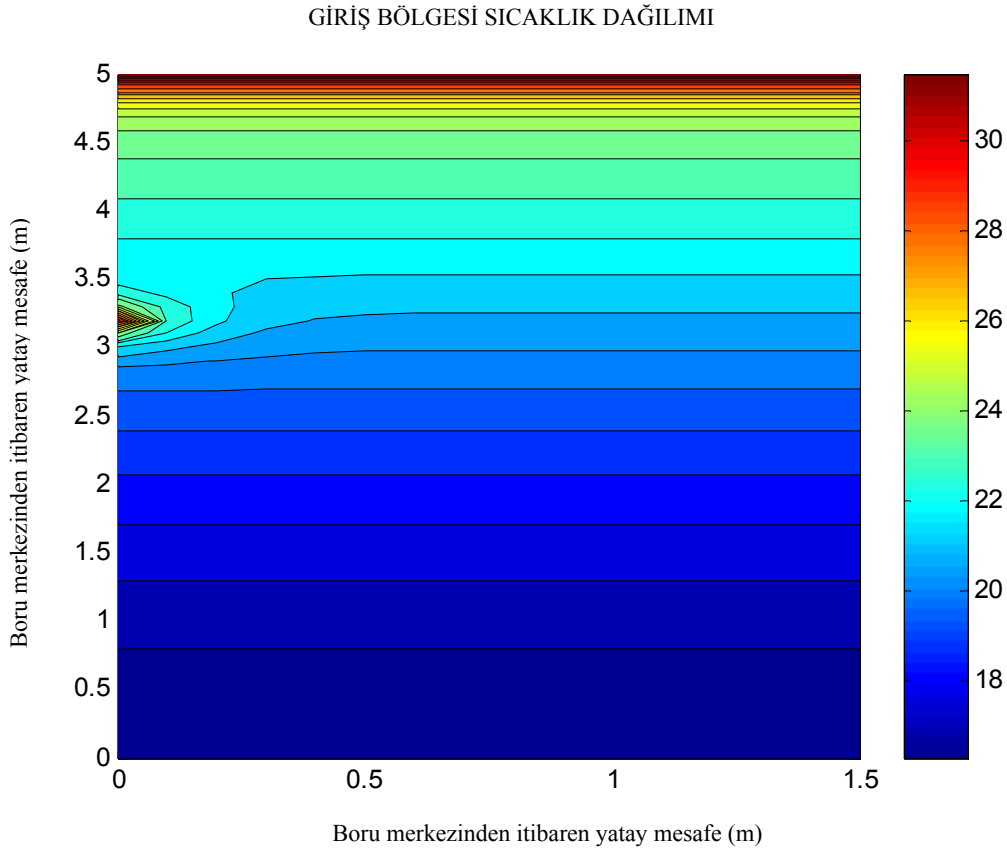
Topraktaki sıcaklık dağılımını bulmak üzere ısı iletimi denkleminin verilen sınır koşulları yardımıyla sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen denklem sistemleri ve nihayetinde oluşacak matris sistemlerinin çözümü için herhangi bir programlama dili kullanabiliriz. Biz burada matematiksel ve matris işlemlerine yardımcı pek çok fonksiyonu bünyesinde barındıran MATLAB'i kullanmaya karar verdik. MATLAB ile grafik ara yüz kullanılarak çözüm bölgesi ile ilgili bilgilerin ve çözüm sonuçlarının gösterildiği bir MATLAB programı hazırlanmıştır. Bu programın ekran görüntüsü Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1 MATLAB ortamında geliştirilen programın ekran görüntüsü

Programda andırım için gerekli bilgiler girilmekte ve daha sonra başlat seçeneği ile andırım başlatılmakta ve andırım süresine bağlı olarak bir müddet sonra hesaplanan değerlere

ulaşlabilmektedir. Borudan itibaren yatay ve düşey eksendeki sıcaklık dağılımları ile akışkan çıkış sıcaklıkları programın çalıştığı klasöre düz metin formatında kaydedilmektedir. Bu veriler daha sonra Excel programında kullanılabilir. Programın grafik seçeneklerinde ise andırım sonucunda elde edilen yatay ve düşeydeki sıcaklık dağılımı, giriş kesitindeki sıcaklık dağılımı ve boru boyunca olan sıcaklık değişimi grafik olarak çizdirilebilmektedir. Şekil 5.2’de ise örnek bir hesaplama için giriş kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir.

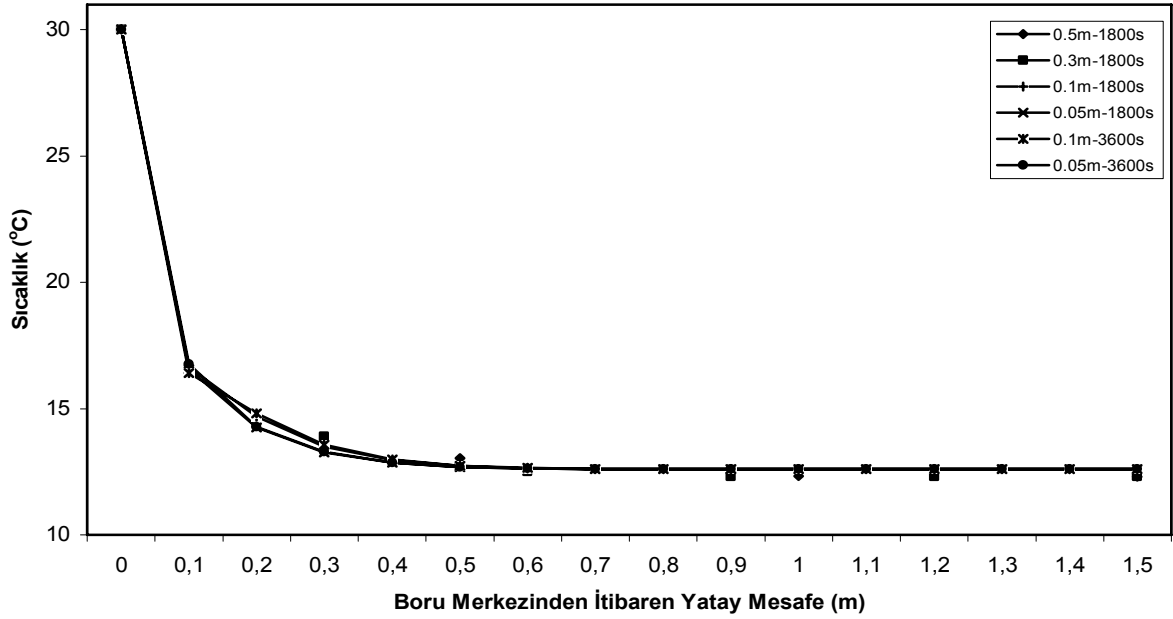


Şekil 5.2 MATLAB ortamında geliştirilen programın ekran görüntüsü

Programda çözüm parametrelerini optimize etmek için farklı ızgara aralıkları ve zaman adımlarında andırımlar yapılmıştır. Ayrıca boru boyunca sıcaklık çok fazla değişmediğinden andırımda z yönündeki ızgara aralığının 1 m alınması yeterlidir. Çok uzun boru boylarında bunun andırım süresine etkisi büyüktür. Çok küçük ızgara aralıkları seçmek daha büyük boyutta matrislerin oluşması ve daha çok bilgisayar gücü anlamına gelmektedir. Şekil 5.3’te bu ızgara aralığı ve zaman adımının sonuçlar üzerindeki etkisi görülmektedir.

Şekil 5.3’te bu etki borudan itibaren yataydaki sıcaklık değişimleri için verilmiştir. Bizim için en ideal olanı andırım zamanı ve gerekli bilgisayar kapasitesi göz önüne alındığında x ve y yönünde 0.1 m, z yönünde 1 m ızgara aralığı ve 1800 s zaman adımındır. Ancak x ve y

yönünde 0.05 m, z yönünde 0.5 m ızgara aralığı ve 1800 s zaman adımı alınarak daha kararlı sonuçlar elde edilebilir. Bu da doğal olarak andırım zamanının uzun süreli tahminler için oldukça uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle burada x ve y yönünde 0.1 m, z yönünde 1 m ızgara aralığı ve 1800 s zaman adımını kullanılacaktır.



Şekil 5.3 Izgara aralığı ve zaman adımının sonuçlara etkisi

Programdan elde edilen bilgilerin güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla daha önce yapılmış teorik ve deneysel çalışmalarla karşılaştırma yoluna gidilmiştir. Bu amaçla Mei tarafından yapılan çalışmadaki deneysel veriler kullanılarak bir mukayese yapılmıştır. Kış mevsimi için deney şartları Mei tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

$L = 152.5$  m,  
 $h = 1.2$  m,  
 $d_d/d_i = 46.5/40.9$  mm,  
 Boru malzemesi = orta yoğunlukta polietilen,  
 $k_b = 0.46$  W/m K,  
 $C_{pb} = 2174$  J/kg K,  
 Akışkan = su - %20 etilen glikol çözeltisi,  
 $k_a = 0.51$  W/m K,  
 $C_p = 3900$  J/kg K,  
 Toprak tipi = %10 nemli kumlu toprak,  
 $k_t = 1.731$  W/m K,  
 $\alpha_t = 0.0036$  m<sup>2</sup>/h,  
 $V_a = 0.972$  m<sup>3</sup>/h,

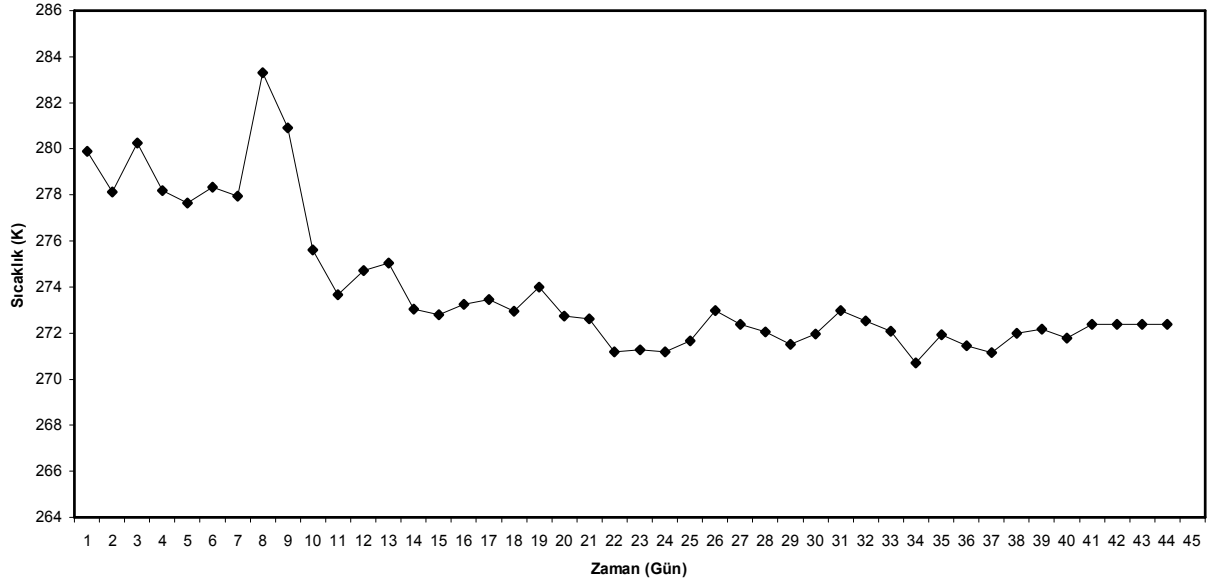


$$T_{t,ort} = 10.232 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{t,gen} = 12.759 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\varphi_1 = 0.352 \text{ rad.}$$

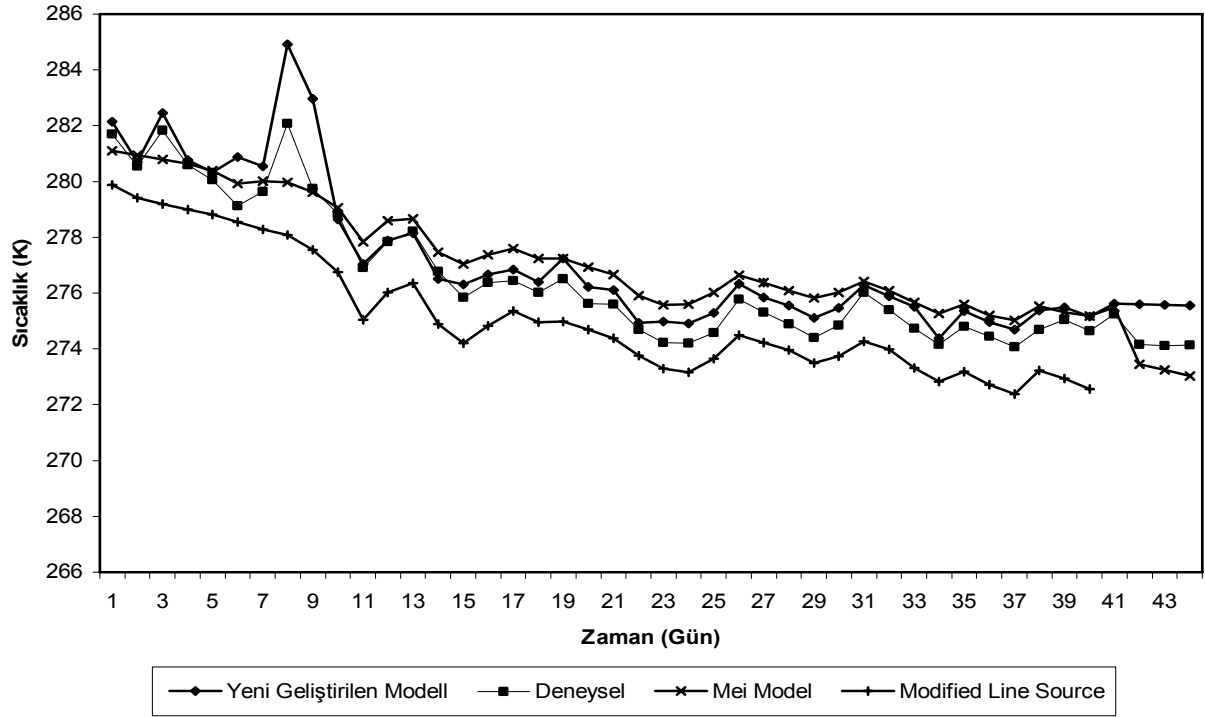
Kış şartlarında toprak ısı değiştircisine akışkan giriş sıcaklığı Şekil 5.4'te, andırımdan elde edilen verilerin deneysel verilerle ve diğer modellerle karşılaştırması ise Şekil 5.5'de grlmektedir.



Şekil 5.4 Kış şartlarında akışkanın ısı değiştircisine giriş sıcaklığı

Buradan da görüleceği üzere yeni geliştirilen model deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir. Deneysel verilerden elde edilen akışkan giriş sıcaklığları programa girilmiş ve sonucunda akışkanın ısı değiştircisini terk ettiği sıcaklığlar hesaplanmıştır. Programdan elde edilen veriler deneysel verilerden daha yüksek değerlerde olmasına rağmen diğer modellere göre daha uyumlu sonuçlar vermektedir.

Şekil 5.6'da yaz şartlarında akışkanın toprak ısı değiştircisine giriş sıcaklığı grlmektedir. Yaz mevsiminde toprağın ısı iletim katsayısı kış mevsiminden daha farklıdır. Bunun nedeni kış aylarında yağış nedeniyle oluşan toprağın nemindeki değişimdir. Şekil 5.7'de ise yaz şartlarında yapılan andırımın deneysel verilerle ve diğer modellerle mukayesesi grlmektedir.



Şekil 5.5 Kış şartlarında akışkan çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması

Yaz mevsimi için deney şartları yine Mei tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$L = 213 \text{ m,}$$

$$h = 1.2 \text{ m,}$$

$$d_d/d_i = 42.2/35 \text{ mm,}$$

Boru malzemesi = yüksek yoğunlukta polietilen,

$$k_b = 0.46 \text{ W/m K,}$$

$$C_{pb} = 2174 \text{ J/kg K,}$$

Akışkan = su - %20 metanol çözeltisi,

$$k_a = 0.351 \text{ W/m K,}$$

$$C_p = 4109 \text{ J/kg K,}$$

$$k_t = 0.5624 \text{ W/m K,}$$

$$\alpha_t = 0.002226 \text{ m}^2/\text{h,}$$

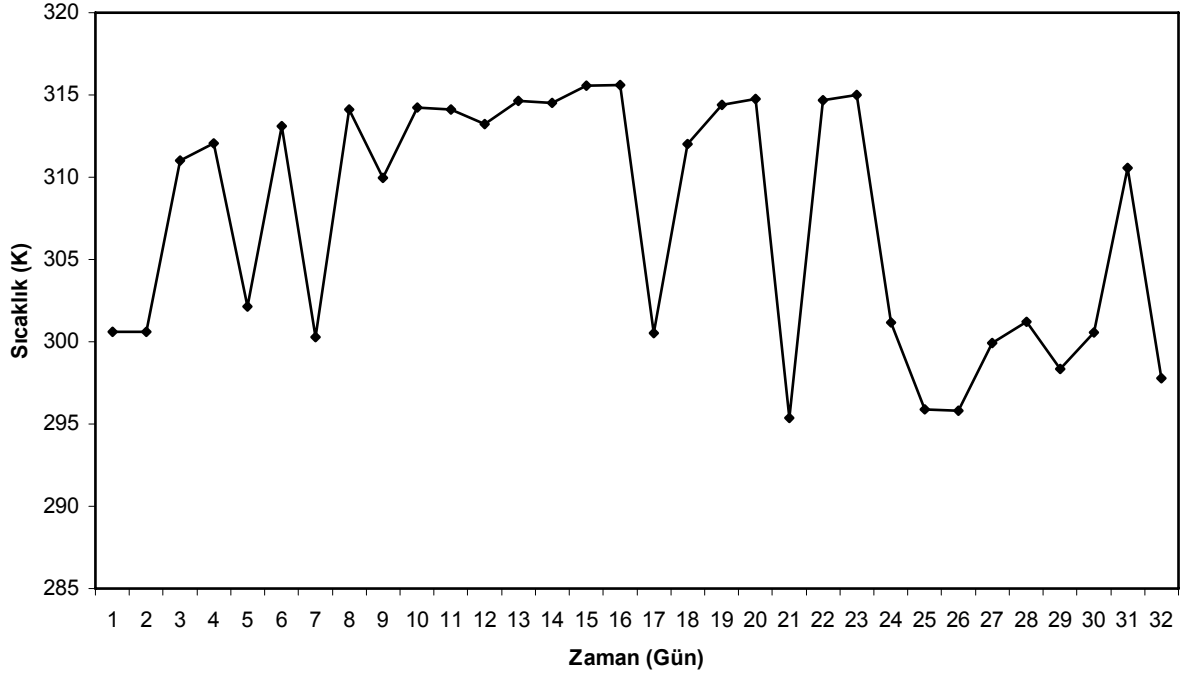
$$V_a = 1.915 \text{ m}^3/\text{h,}$$

$$T_{t,ort} = 15.6 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$T_{t,gen} = 11.1 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$\phi_1 = 0.44 \text{ rad,}$$

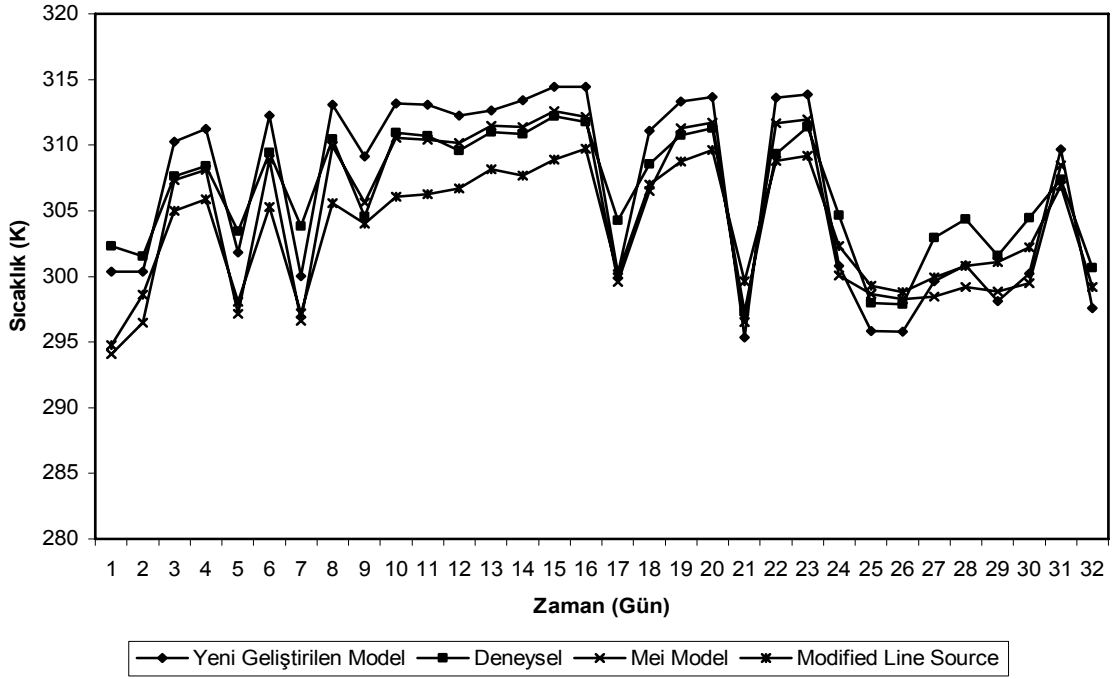
$$k_d = 1.113 \text{ W/m K.}$$



Şekil 5.6 Yaz şartlarında akışkanın ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı

Şekil 5.7'den de görüleceği üzere yeni geliştirilen model ve deneysel veriler biri birleriyle uyumaktadır. Burada Mei modeli daha doğru sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni Mei'nin yaptığı modelde boru çevresindeki dolgu malzemesinin özelliklerini hesaplamalara dâhil etmesidir. Ayrıca kış şartlarında toprağın neminde önemli miktarda bir değişim olmamakta ve dolayısıyla toprağın ısı iletkenliği çok fazla değişim göstermemektedir. Yaz mevsiminde toprağa giden akışkan sıcaklığı toprak sıcaklığından daha yüksek olduğundan boru çevresindeki toprak kütle geçişi nedeniyle kurumakta ve bu da toprak ısı iletkenliğinin azalmasına sebep olmaktadır.

Bu da andırım sırasında sabit alınan toprak özellikleri ve ayrıca deneysel çalışmada kullanılan boru etrafındaki dolgu malzemesinin topraktan farklı özellikte olması, deneysel verilere göre, daha farklı sonuçlar elde etmemize sebep olmaktadır. Dolgu malzemesinin ısı iletkenliğinin daha fazla olması dolayısıyla toprağa daha fazla ısı atılması ve buradan da boru içerisinde dolaşan akışkanın daha düşük sıcaklıkta ısı değiştiricisini terk etmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.7 Yaz şartlarında akışkan çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması

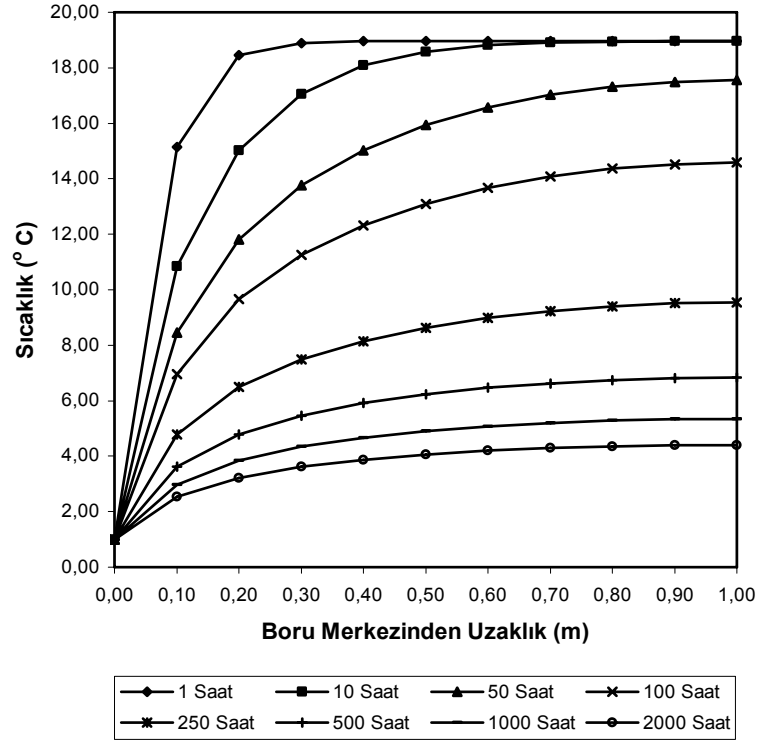
Elde edilen bilgiler ışığında modelin diğer modellerle ve deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu ve bize optimum dizayn şartlarını tespit etmemizde yol gösterebileceği sonucuna varılmıştır. Bundan sonra toprak ısı değiştiricisi üzerinde çeşitli parametrelerin etkisi saptanacak ve en uygun ısı değiştiricisi özellikleri tespit edilmeye çalışılacaktır.

### 5.5 Optimum Toprak Isı Değiştiricisi Özelliklerinin Belirlenmesi

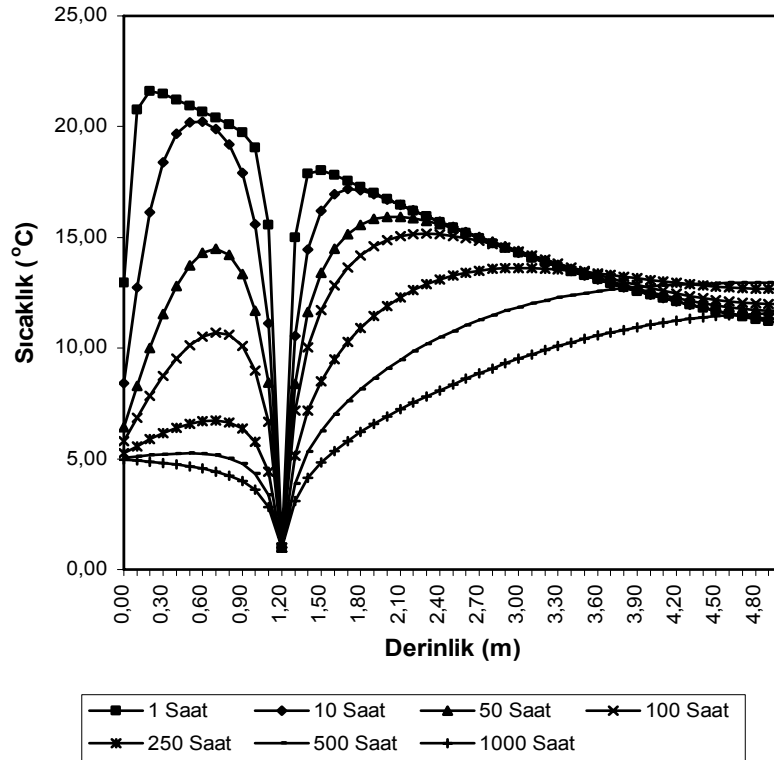
MATLAB kullanarak yazılan program yardımıyla optimum toprak ısı değiştiricisi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla değişik şartlarda çözümler yapılmıştır. Kullanılan tasarım değişkenleri aşağıdaki gibi alınmıştır:

Toprak tipi kumlu ve %10 nemli,  
 $k_t = 1.731 \text{ W/m K}$ ,  
 $\alpha_t = 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  
 $T_{t,ort} = 10.232 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $T_{t,gen} = 12.759 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $\phi_1 = 0.352 \text{ rad}$ ,  
 $T_a = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $T_h = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $h_y = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Sistemin çözümünde  $\Delta t = 1800 \text{ s}$  ve  $\Delta x = \Delta y = 0.1 \text{ m}$  alınmıştır.



Şekil 5.8 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi

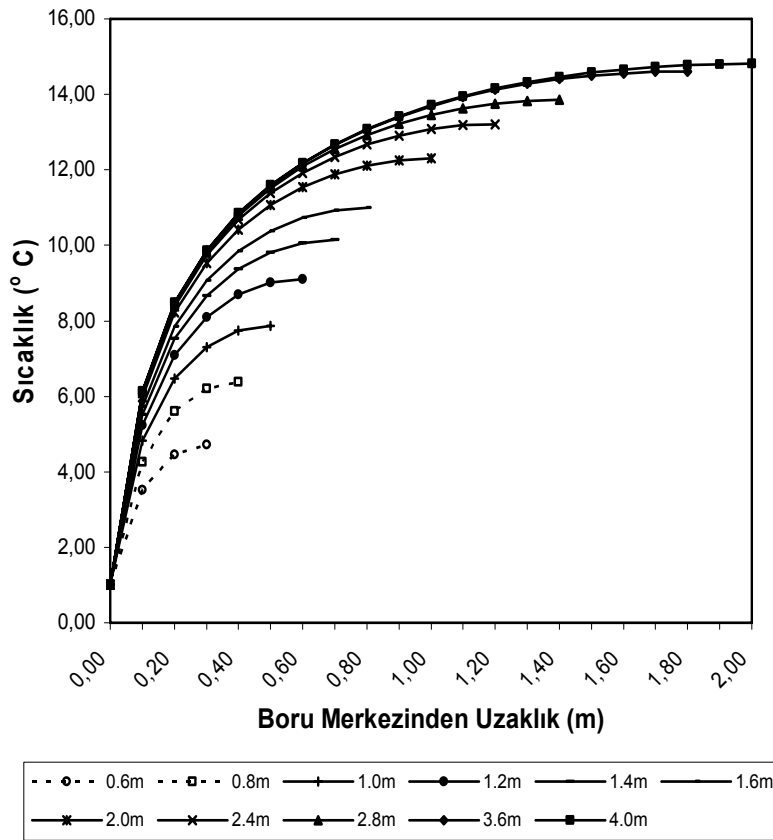


Şekil 5.9 Toprak yüzeyinden itibaren toprak sıcaklığının düşeydeki değişimi

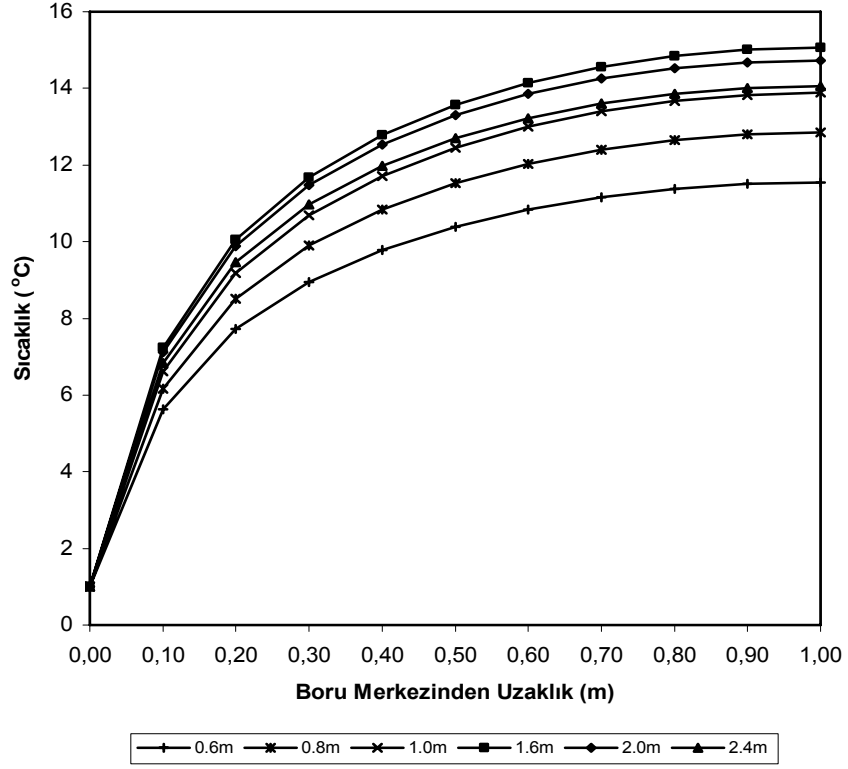
Şekil 5.8’de boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi görülmektedir. Borular arası mesafe 2 m, boruların gömülme derinliği 1.2 m ve yılın 40. günü için hesaplamalar yapılmıştır. Buradan görüleceği üzere toprak sıcaklığı zamanla azalmakta ve 2000 saatten sonra toprak sıcaklığındaki değişim ancak uzun süreler sonunda gerçekleşmektedir. Şekil 5.9’da ise boruyu dikey olarak kesen eksendeki derinliğe bağlı toprak sıcaklığı görülmektedir.

Burada borular arası mesafe 2 m, boruların gömülme derinliği 1.2 m ve yılın 40. günüdür. Zamanla toprak sıcaklığı üst yüzeydeki havanın ve gömülü borunun sıcaklığından etkilenmektedir. Ancak belirli bir derinlikten sonra etkilenmemiş toprak sıcaklığına ulaşılmaktadır. Genel olarak 10 m ve daha derinde toprak sıcaklığının yıl boyunca değişmediği söylenebilir. Ayrıca bu derinlikte toprak sıcaklığındaki değişim de sıfır alınabilir.

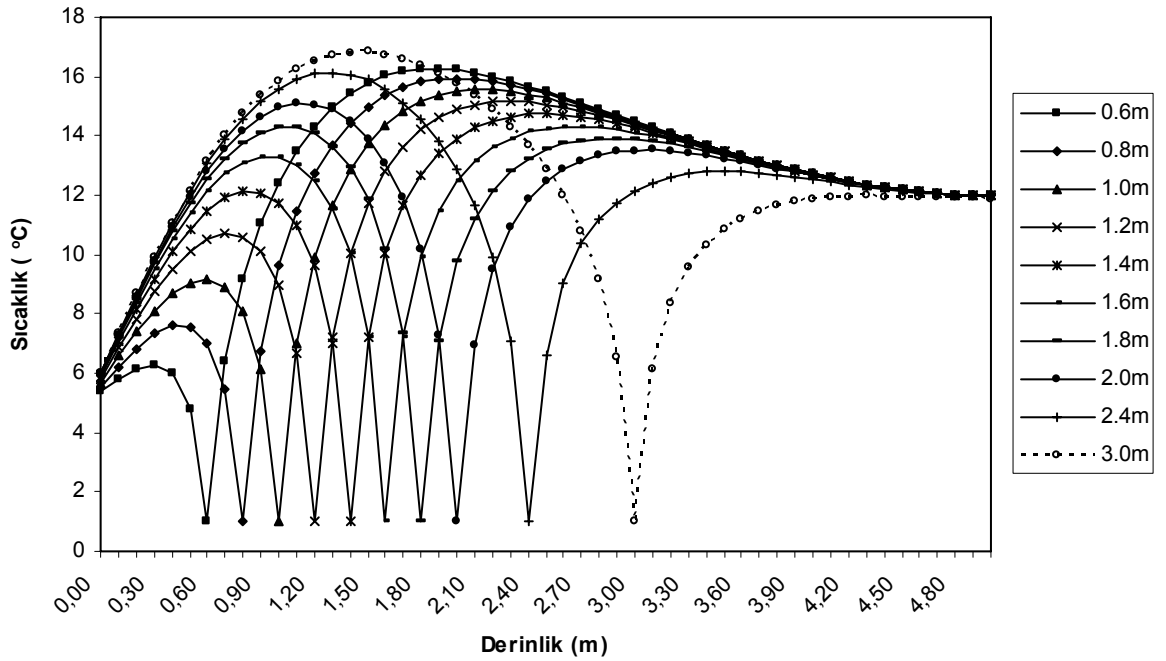
Şekil 5.10’da farklı borular arası mesafelerde 150 saatlik bir andırım yapılmış ve boruların gömme derinliği 1.2 m ve yılın 40. günü alınmıştır. Şekil 5.10’dan borular arası mesafenin 3.6 m veya daha fazla olması durumunda 150. saat sonunda tam orta noktadaki toprak sıcaklığının yakınındaki boru tarafından etkilenmediği görülmüştür.



Şekil 5.10 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi



Şekil 5.11 Boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi



Şekil 5.12 Toprak yüzeyinden itibaren toprak sıcaklığının düşeydeki değişimi

Boruların gömme derinliğini değiştirdiğimizde ise daha ilginç bir sonuçla karşılaşmaktayız. Şekil 5.11’de ve Şekil 5.12’de görüldüğü üzere boruların gömme derinliğine bağlı olarak toprak sıcaklığının arttığı ancak 1.6 m’den itibaren tekrar azalmaya başladığı görülmektedir.

Bunun nedeni daha derine indikçe yüzey sıcaklığının etkisinin derin toprak tabakasına etkisinin daha da azalması ve dolayısıyla buradaki toprak sıcaklığının artmasıdır. Burada ise borular arası mesafe 2 m ve yılın 40. günü alınmış ve 100 saatlik bir andırım yapılmıştır.

Andırım sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak paralel borulardan oluşan yatay toprak ısı değiştiricisi için ideal gömme derinliğinin en az 1.6 m ve uzun süre topraktan ısı çekilmesi durumunda boruların biri birlerini etkilememeleri için aradaki mesafenin en az 3.0 m olması gerektiği görülmüştür. Bu Şekilde dizayn edilen ısı değiştiricisinden optimum fayda sağlamak mümkün olmaktadır. Ayrıca burada ısı pompasının günlük ve yıl boyu çalışma bilgileri kullanılarak optimizasyon yapılması daha uygun olacaktır. Çünkü bizim verdiğimiz değerler uzun süreli ve aralıksız ısı pompası çalışma şartına göredir. Aralıklı çalışan bir ısı pompası için borular arası mesafe elverdiği oranda daha da düşük alınabilir. Bu sayede gerekli toprak yüzey alanı azaltılabilir.



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmadaki amaç gerçek bir paralel borulu yatay toprak ısı değiştiricisinin performansını incelemek ve matematiksel modelin geçerliliğini kanıtlamak için çeşitli veriler elde etmektir. Bu amaçla 4 kW ısıtma kapasitesine sahip bir ısı pompası sistemi kurulmuştur. Isı pompası buharlaştırıcısında ortamdan 2.7 kW ısı çekilebilmektedir. Yoğuşturucu tarafında ise ortama 4 kW ısı aktarmaktadır. Isı pompası yazın soğutma ve kışın ısıtma amaçlı kullanıma uygundur. Isı pompasının toprak ısı değiştiricisi her biri 40 m boyunda 3 adet 20/2.7 mm paralel PPRC borudan ve 50 mm anma çapında PPRC kolektörlerden oluşmaktadır. Daha önceki bölümde andırımdan elde edilen bilgiler ışığında borular 1.8 m derinliğe gömülmüştür. Borular arası mesafe ise 3 m olarak seçilmiştir. Bu şekilde optimum bir toprak ısı değiştiricisi dizayn edilmiştir. Bu toprak ısı değiştiricisi yardımıyla 4 kW'lık bir enerjiyi toprağa aktarmak veya topraktan çekmek mümkündür.

Deneysel ısı pompası sistemi Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü'nde 800 m<sup>2</sup> açık arazi üzerinde kurulmuştur. Toprak ısı değiştiricisinin bulunduğu bölgede ağaç bulunmamaktadır ve tüm yüzey etkilerini (ışınım vb.) görmek mümkündür.

### 6.1 Deney Tesisatı

Deney tesisatı genel hatlarıyla aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Toprak ısı değiştiricisi devresi,
- Isı pompası,
- Kontrol ve ölçüm sistemi.

#### 6.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi

Toprak ısı değiştiricisi devresi paralel borulu toprak ısı değiştiricisi, pompa ve bir adet depodan oluşmaktadır. Depodaki su ısı pompası yardımıyla şartlandırılmaktadır. Kullanılan ısı değiştiricisi yukarıda bahsedildiği gibi her biri 40 m boyunda 3 adet 20/2.7 mm paralel PPRC borudan ve 50 mm anma çapında PPRC kolektörlerden oluşmaktadır. Matematiksel modeli doğrulamak amacıyla borular 1.8 m derinliğe gömülmüştür. Isı değiştiricisi ile depo arasındaki borular ise ¾" çapındadır. Gömme derinliğinin 1.8 m seçilmesindeki amaç yıl boyu toprak sıcaklığındaki salınım miktarının ve hafriyat giderlerinin optimum olduğu noktada olmasıdır. Daha derine indikçe toprak sıcaklığı daha kararlı hale gelmesine rağmen daha derin çukurların kazılması için gerekli işgücü ve hafriyat giderleri artmaktadır. Isı değiştiricisinde dolaşan akışkanın toprak ısı değiştiricisine giriş, çıkış sıcaklıklarını ve topraktaki sıcaklık

dağılımını ölçmek üzere deney tesisatında ısılı çiftlerden yararlanılmıştır. Toprak sıcaklığını ölçmekte kullanılan ısılı çiftler toprak ısı değiştiricisini paralel boruların kolektöre bağlantı noktasından 25 m uzaklıkta ve boruların eksenine dik bir düzlem üzerinde olacak şekilde yerleştirilmiştir. şekil 6.1’de toprak ısı değiştiricisinin gömüleceği çukur ve şekil 6.2’de ise toprak ısı değiştiricisinin gömülmeden önceki hali görölmektedir.

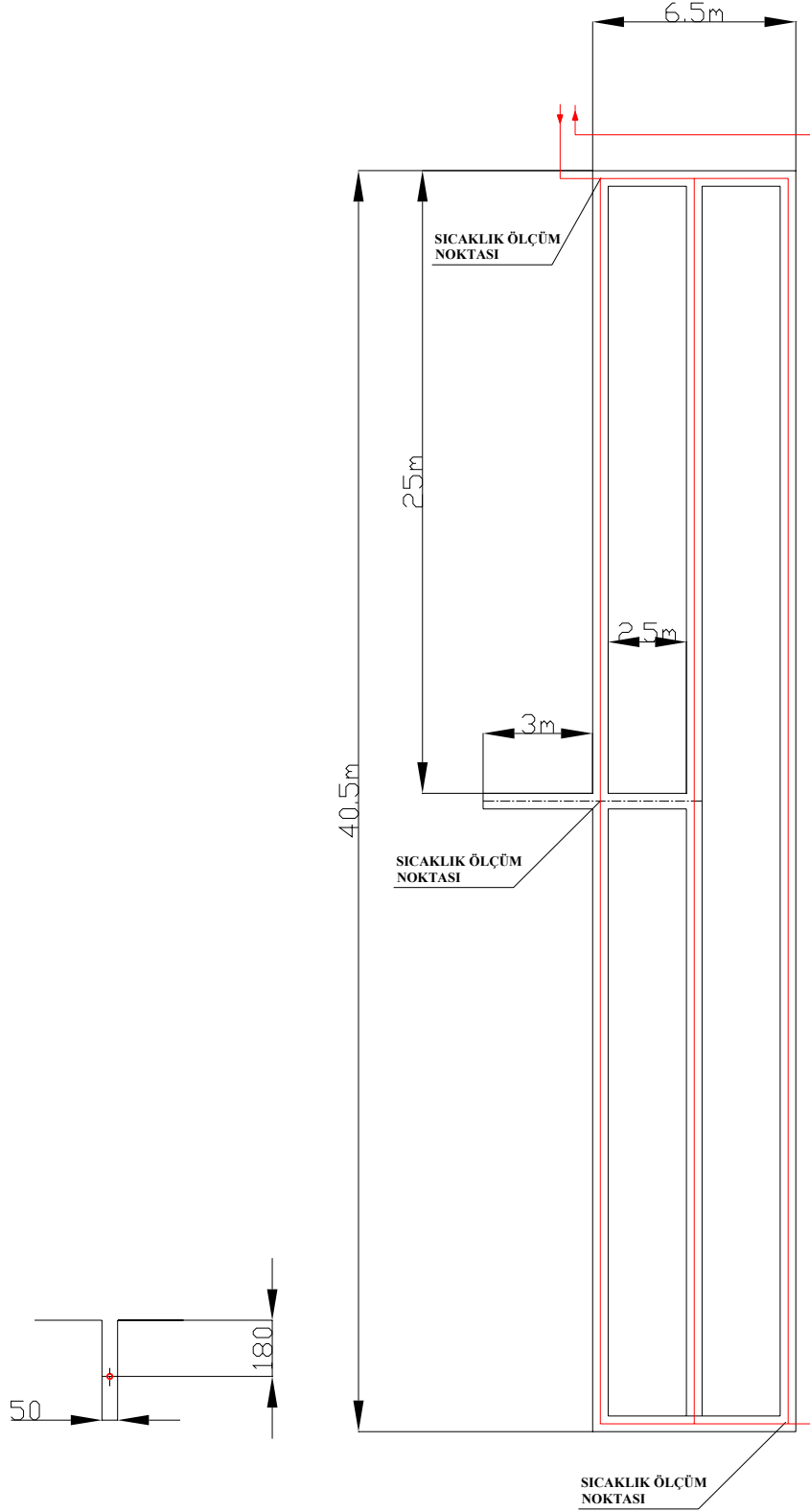


şekil 6.1 Toprak ısı değiştiricisinin yerleşimi



şekil 6.2 Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi

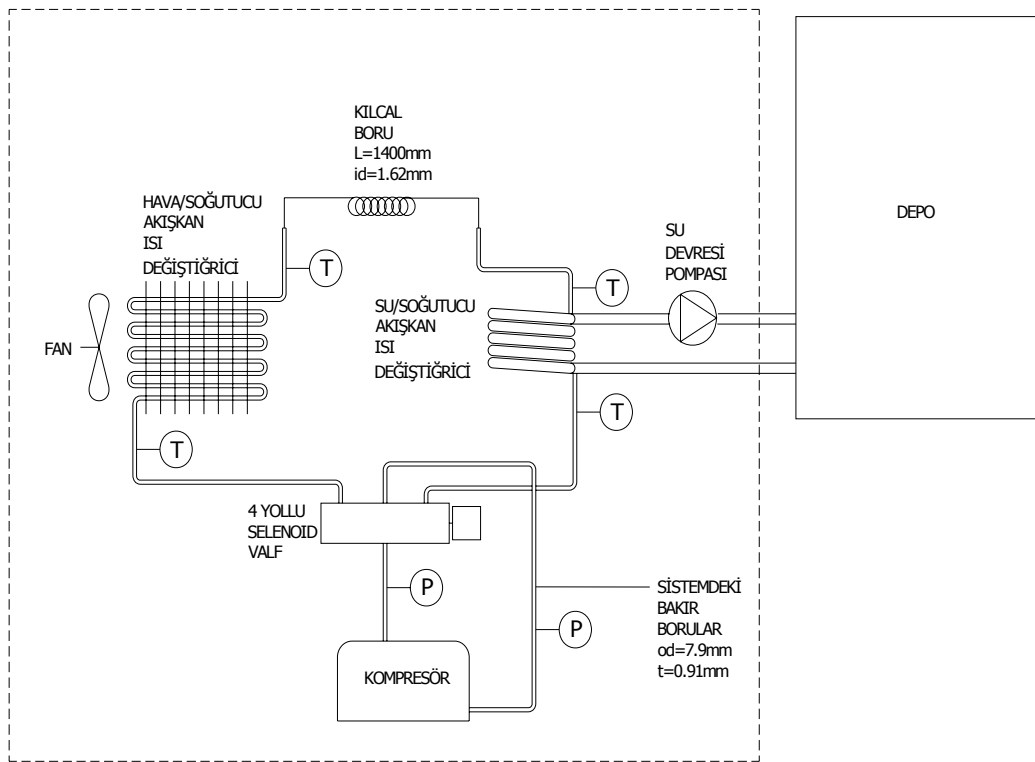
Şekil 6.3'te ise toprak ısı değiştiricisi hafriyat detayları görölmektedir. Açılan çukurlara paralel borulu toprak ısı değiştiricisi ve belirtilen noktalara da toprak ve akışkan sıcaklıklarını ölçmek için ısı çiftleri yerleştirilmiştir.



Şekil 6.3 Toprak ısı değiştiricisi hafriyat ve sıcaklık ölçüm detayı

### 6.1.2 Isı Pompası

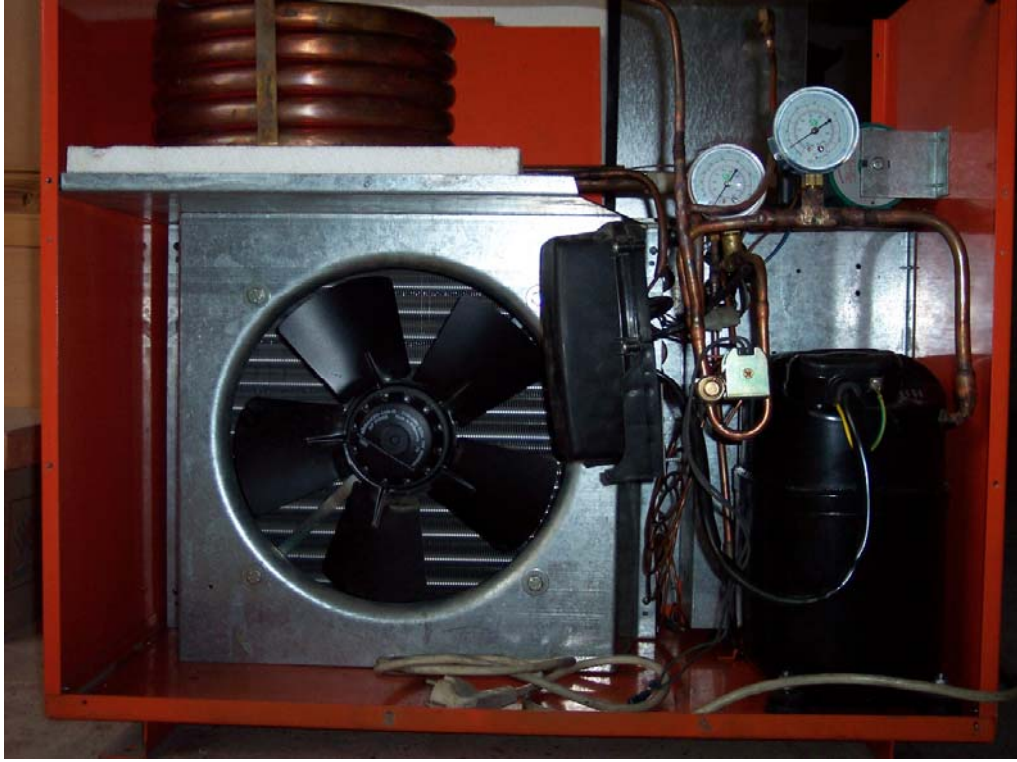
Tesisatta kullanılan ısı pompası 4 kW gücünde ve havadan suya çalışan bir ısı pompasıdır. Bu nedenle ısı pompası içinde bulunduğu kabinle toprak arasında ısı taşıyıcı olarak görev yapmaktadır. Toprak ısı değiştiricisinin hava tarafı kanallarla kabin dışına bağlanmıştır. Bu nedenle %100 dış hava kullanılmakta ve ısı değiştiricisinden çıkan hava tekrar dışarı atılmaktadır. Bu şekilde tasarlamamızın sebebi kabinin küçük olması ve ısı pompasının kabin içindeki havayı kısa sürede şartlandırması ve bir müddet sonra ısı pompasından istediğimiz verimi alamamamızdır. Isı pompasının şematik olarak gösterimi Şekil 6.4 ve bir resmi Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.4 Deneyde kullanılan ısı pompasının şematik gösterimi

Depo içerisindeki su termostat ve ısı pompası yardımıyla istenen sıcaklıkta tutulmakta ve böylece toprak ısı değiştiricisine suyun sabit sıcaklıkta girmesi sağlanmaktadır. Depodan toprak ısı değiştiricisi girişine kadar olan borular yalıtılmıştır.

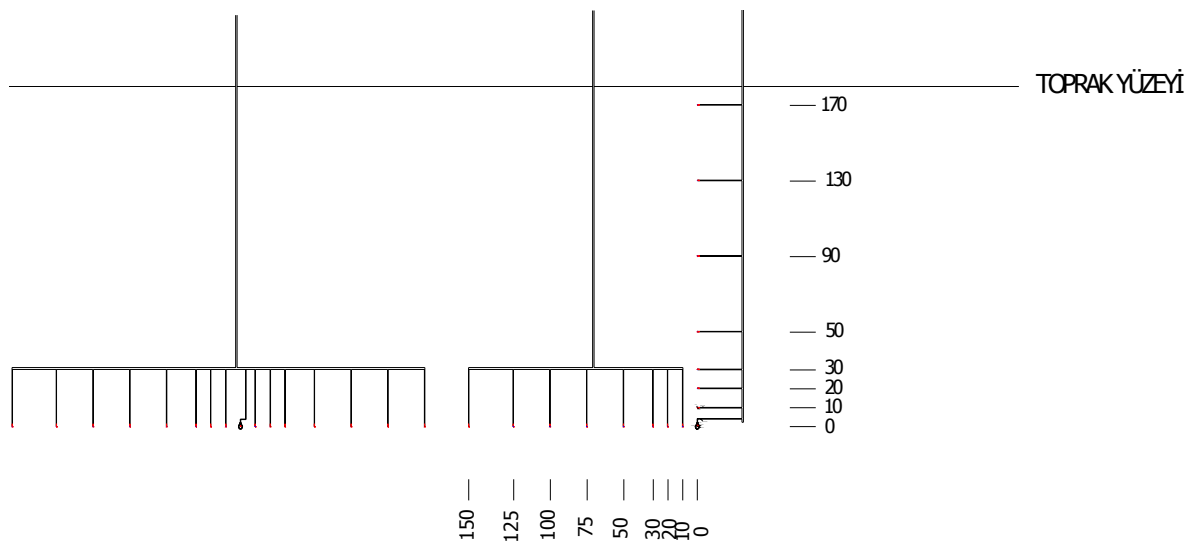
Depo ile toprak ısı değiştiricisi arasında bulunan bir pompa suyun toprak ısı değiştiricisinde dolaşımını sağlamaktadır. Pompa çıkışındaki bir ayar vanası yardımıyla toprak ısı değiştiricisine giden suyun debisi kontrol edilmektedir.



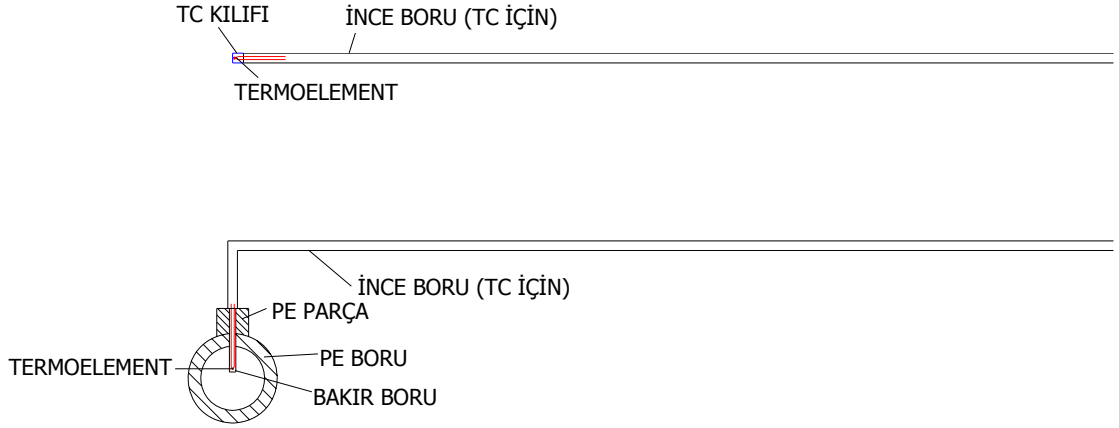
Şekil 6.5 Deney tesisatında kullanılan ısı pompası

### 6.1.3 Kontrol ve Ölçüm Sistemi

Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi akışkan giriş-çıkış sıcaklığı ve toprak içindeki sıcaklık dağılımını ölçmek için toplam 34 adet ısıl çift kullanılmıştır. Isıl çiftler T tipidir. Isıl çiftlerin toprak içindeki yerleşimi Şekil 6.6’da görölmektedir.



Şekil 6.6 Isıl çiftlerin toprak içinde yerleşimi



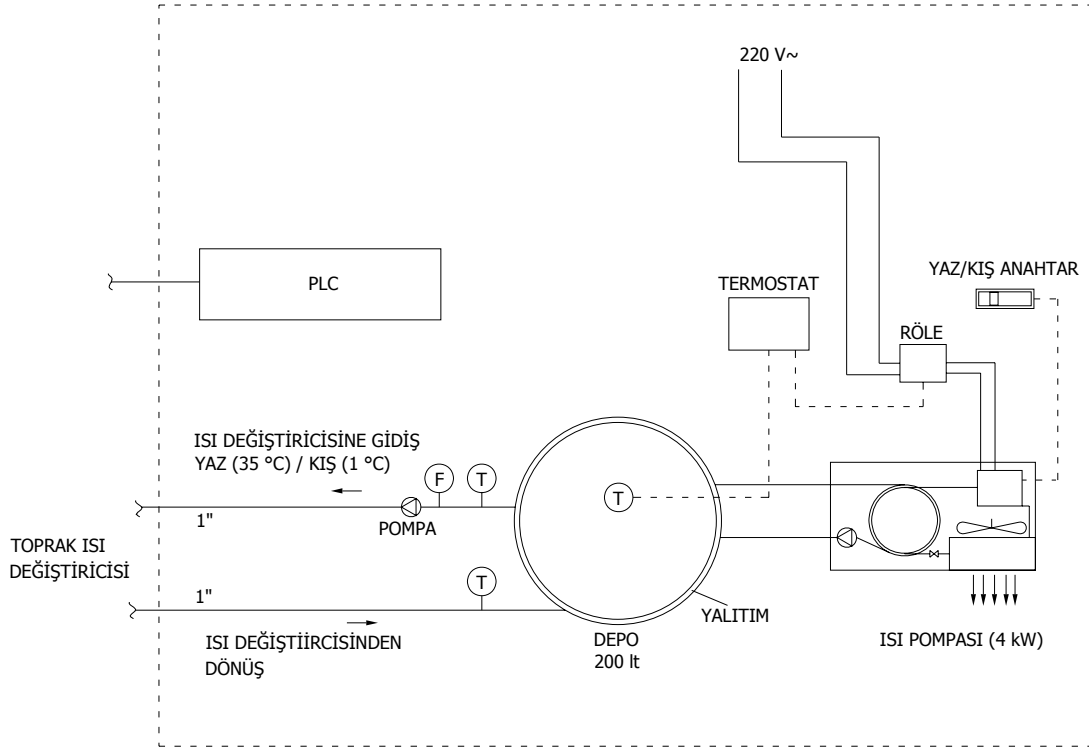
Şekil 6.7 Isıl çiftlerin boru ve toprak içinde yerleşimi

Şekil 6.7'da ise ısı çiftlerinin toprak içine yerleştirme şekli ve boruya bağlantı şekli görülmektedir. Isıl çiftlerinin toprak ve dolayısıyla topraktaki suyla ve boru içindeki akışkanla doğrudan teması önlenerek uzun süre ölçüm hassasiyeti sağlanmaya çalışılmıştır. Ölçüm için ısı çiftleri PLC'ye bağlanmıştır. Toplam 64 kanal kapasiteli bir PLC sistemi kullanılmıştır. PLC'nin dâhili hafızasına tüm kanallardan saatte birer ölçüm alınarak toplam 8 günlük veri saklanabilmektedir. PLC sistemi ölçüm noktasına yakın bir yerde ve kabin içerisindedir.



Şekil 6.8 PLC ve ısı çiftlerinin bağlantısı

Şekil 6.9’da ise kabin içi kontrol ve ölçüm sistemi görülmektedir. Isı pompasının ısıtma veya soğutma konumu yaz/kış anahtar yardımıyla seçilmektedir. Termostat ısı pompasına kumanda etmektedir ve böylece depo içindeki sıcaklık sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Depo ise ortamla ısı alış verişini engellemek üzere yalıtılmıştır.



Şekil 6.9 Kabin içi ölçüm ve kontrol sistemi

Depo içindeki sıcaklık bir adet termostat ve bir adet röle yardımıyla  $\pm 0.3$  °C hassasiyetle sabit tutulabilmektedir. Termostatın hassasiyeti  $\pm 0.1$  °C olmasına rağmen çok düşük sıcaklıklarda termostatın ısı pompasını çok kısa sürelerde devreye alıp devreden çıkarmasını önlemek için sıcaklığı bu aralıkta kontrol etmek daha uygun olmaktadır.

Akışkan debisi ise depo dönüşünde rotametre yardımıyla ölçülmektedir. Rotametrenin ölçebileceği en yüksek debi  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tir.

### 6.1.3.1 Kalibrasyon İşlemleri

Isıl çiftlerin kalibrasyon işlemleri iki grupta toplanabilir.

- Sabit noktalar yardımıyla kalibrasyon,
- Karşılaştırma yardımıyla kalibrasyon.

Sabit noktalar yardımıyla kalibrasyonda maddelerin erime/donma ve kaynama/yoğuşma

noktaları referans alınarak iyi bilinen bu sıcaklıklarda ısı çiftlerindeki sapmalar değerlendirilir.

Karşılaştırma yardımıyla kalibrasyon yönteminde ise ölçülen sıcaklıklar daha önceden bilinen güvenilir sıcaklık hissedicileri tarafından ölçülen sıcaklıklarla karşılaştırılır. 620 °C'dan daha düşük sıcaklıklar için sabit sıcaklık banyoları kullanılır. Bu banyolarda su, çeşitli yağlar ve molten tuzlarına kadar pek çok akışkan kullanılmaktadır.

Isıl çiftlerin kullanım sıcaklığı aralığında her bir sıcaklık değerine karşılık gelen bir gerilim değeri vardır. Bu gerilimin sıcaklıkla değişimi eğrisel olmakla birlikte küçük aralıklar için doğrusal alınabilir. Bu şekilde her bir ısı çifti için kalibrasyon sonucunda her bir sıcaklığa karşılık gelen gerilimi gösteren bir doğru denklemi bulunabilir. kalibrasyon işlemi sonucunda elde ettiğimiz doğru denklemleri Ek 1'de verilmiştir

## 6.2 Deneysel Çalışma Yöntemi

Deneysel çalışmadaki esas amacımız kurulan deney tesisatından gerekli verileri alarak teorik model ile bir karşılaştırma yapabilmek ve gerçek hayattaki durum ile ilgili çeşitli yargılarda bulunabilmektir. Bunu için deney tesisatını çeşitli şartlarda çalıştırmak ve sonuçlarını irdelemek gerekir. Toprakta sürekli veya belirli zaman aralıklarla ısı çekilmesi veya toprağa ısı aktarılması, toprak ısı değiştiricisine akışkanın giriş sıcaklığı, akışkanın debisi tüm bunlar toprak ısı değiştiricisinin performansını etkileyen parametrelerdir. Bu nedenle çeşitli şartlar altında farklı deneyler gerçekleştirmek gerekmektedir.

Öncelikle sistemin sürekli çalışma halinde performansı incelenmiştir. Bu durumda topraktaki sıcaklık değişimi ve akışkan giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmanın en başında toprak özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Toprağın ısı özellikleri sayısal çözümde kullanılacağından burada yapılacak hata tüm teorik çalışmayı etkileyecektir. Toprak ısı iletkenliğinin belirlenmesinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

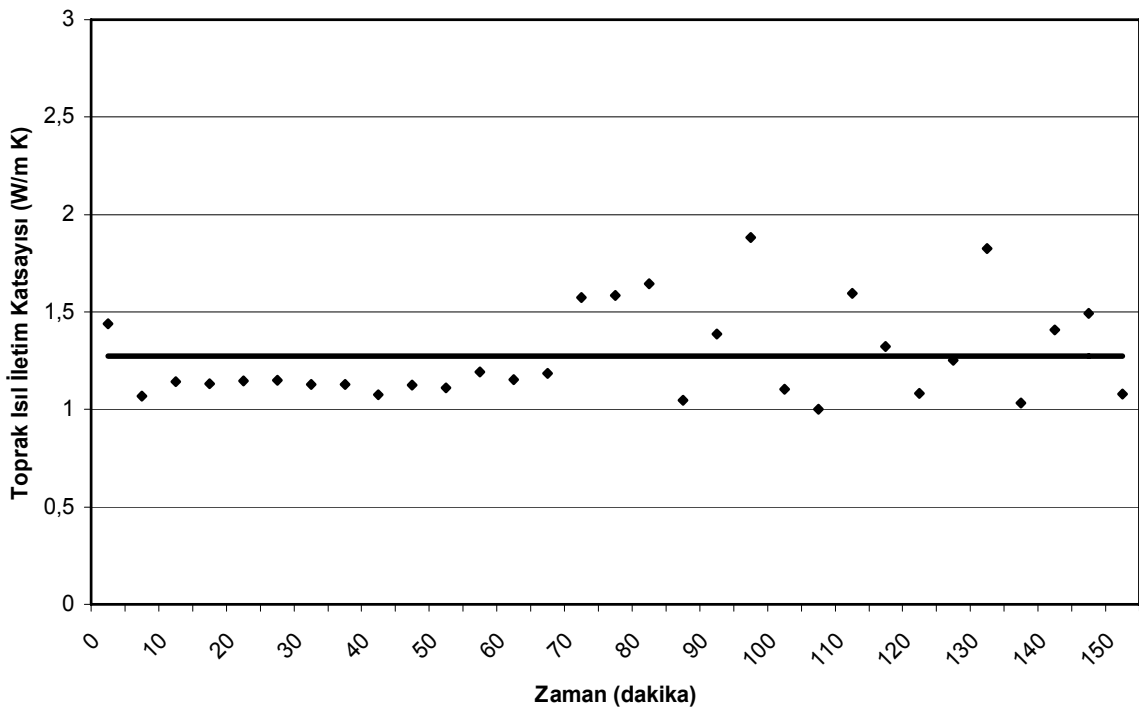
- Boru ile toprak ara yüzeyindeki sıcaklık açısı olarak değişim göstermemektedir,
- Ortalama toprak sıcaklığı boruya yakın bölgedeki ölçülen sıcaklıkların ortalaması olarak alınmıştır,
- Boru içindeki akışkanın sıcaklığındaki değişimin 4.1.3'deki gibi gerçekleşeceği öngörülmektedir.

Yukarıdaki kabullere dayanarak toprağın ısı iletkenliği (4.55) eşitliği yardımıyla hesaplanır.



Toprak sıcaklıkları ve akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları her 5 dakikada bir ölçülmüş ve ölçülen her bir değer için toprağın ısı iletkenliği hesaplanmış, gün boyu yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak günlük ortalama toprak ısı iletkenliği bulunmuştur. Buradaki hesaplanan ısı iletkenlik gerçek ısı iletkenliğinin tahmini bir değeridir. Yukarıdaki kabuller nedeniyle ve ısı aktarıldıkça veya çekildikçe toprağın ısı iletkenliği zamanla değişeceğinden gerçek ısı iletkenlikten bir miktar sapma gösterecektir.

Şekil 6.10'de örnek bir hesaplama görülmektedir. Sürekli çalışma halinde hem sistemin ısı iletkenliğini ölçmek hem de sistemden veri toplamak mümkün olmadığından toprak ısı iletkenliğinin ısı pompasının çalışması sırasında değişmediği kabul edilecektir.



Şekil 6.10 Ölçülen toprak ısı iletim katsayısı ve ortalaması

Deneysel verilerle bilgisayar andırımından elde edilen verileri karşılaştırırken en önemli etken deney şartlarını ve sınır koşullarını modele tam anlamıyla uygulayabilmektir. Andırım için gereken veriler deneysel çalışmadan elde edilmiştir.

### 6.3 Sonuçlar

13 Aralık 2005 saat 12:00'de deneylere başlanmıştır. 20 Ocak 2006 saat 13:00'e kadar toplam 910 saatlik veri toplanmıştır. Bu zaman zarfında sistem aralıksız olarak çalışmıştır. Deneyden elde edilen su giriş sıcaklıkları andırım için teorik su giriş sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Bu

sayede deneysel su giriş sıcaklıklarına göre 910 saatlik topraktaki sıcaklık dağılımı ve su çıkış sıcaklığı hesaplanabilmiştir. Deney şartları aşağıdaki gibidir ve bu değerler andırımında da kullanılmıştır.

$$k_t = 2.18 \text{ W/m K}$$

$$L = 40 \text{ m}$$

$$n = 3$$

$$a = 3 \text{ m}$$

$$h = 1.8 \text{ m}$$

$$\alpha_t = 0.00000068 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V_a = 0.42768 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kullanılan akışkan = su

Boru malzemesi = PPRC

$$k_b = 0.8999 \text{ W/m K}$$

$$d_d/d_i = 20/14.6 \text{ mm}$$

Andırım başlangıç zamanı = 13 Aralık 2005 saat 12:00

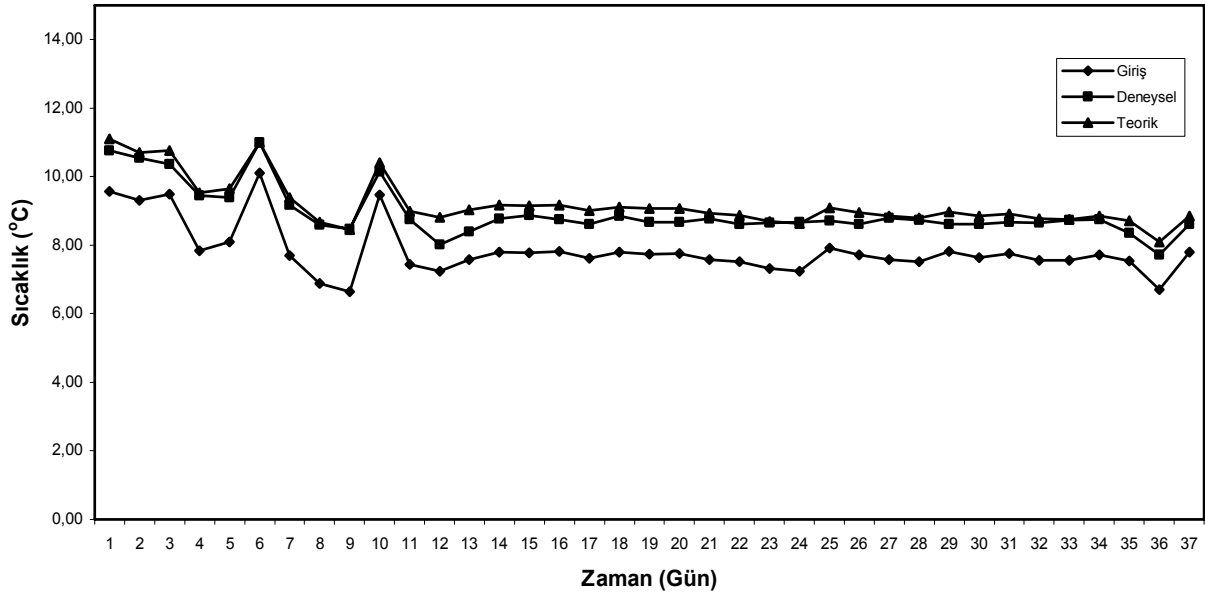
$$dx = dy = 0.1 \text{ m}$$

$$dz = 1 \text{ m}$$

$$dt = 1800 \text{ s}$$

Andırım süresi = 910 h

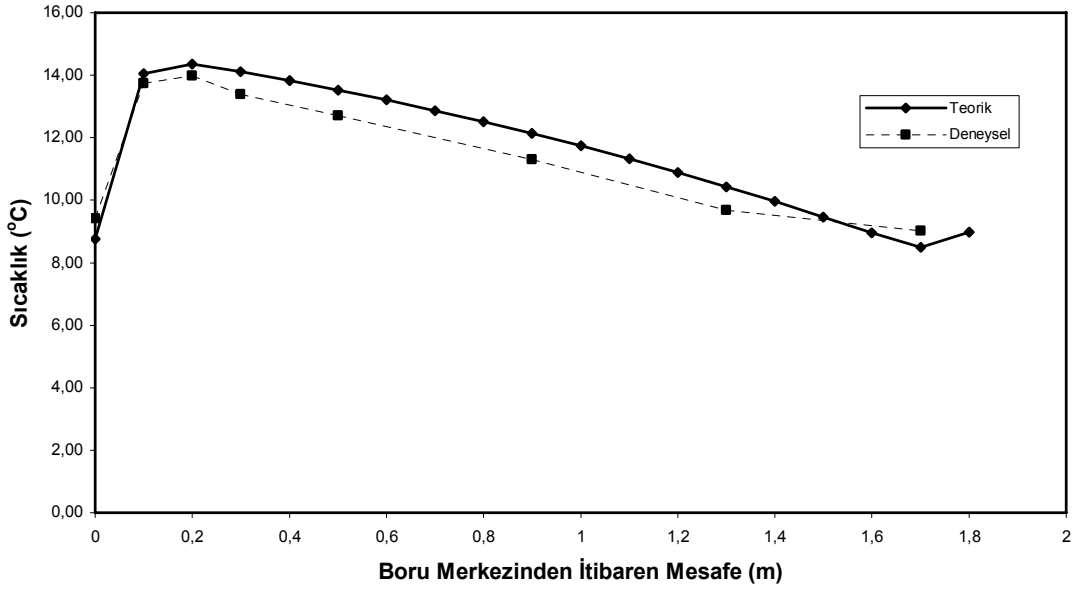
Şekil 6.11’de deneysel su giriş sıcaklığı ile deneysel/teorik su çıkış sıcaklıkları görülmektedir. 910 saatlik deney ve andırım sonucunda elde edilen saatlik verilerin günlük ortalama değerleri bulunarak Şekil 6.11’deki grafik çizilmiştir.



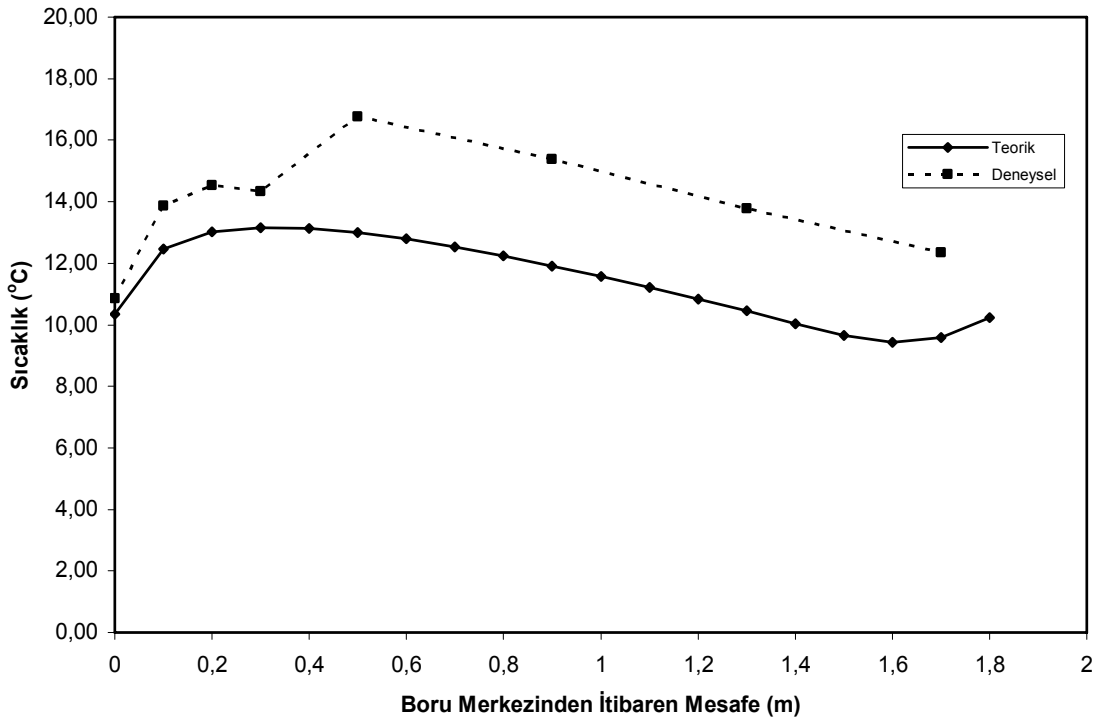
Şekil 6.11 Deneysel su giriş sıcaklığı ve deneysel/teorik su çıkış sıcaklıkları karşılaştırılması

Ölçülen su çıkış sıcaklıkları ile andırımdan elde edilen su çıkış sıcaklıkları arasındaki fark en

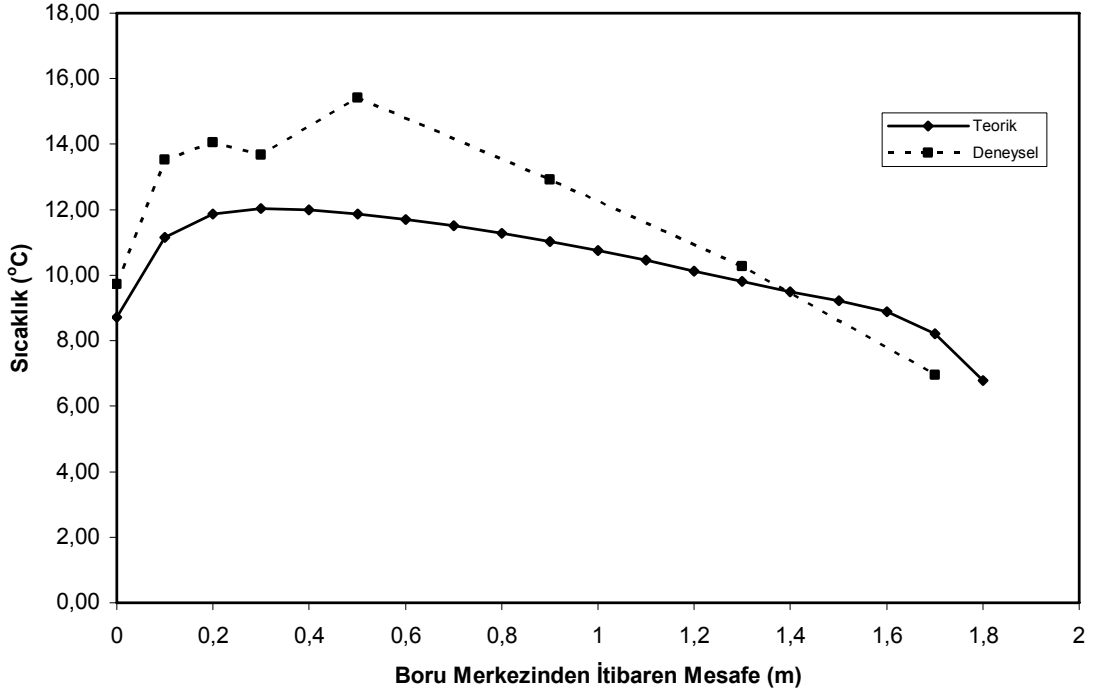
fazla %10.03 kadardır. Şekil 6.12, 6.13, 6.14 ve 6.15’de ise boru ekseninden itibaren düşey eksendeki sıcaklık dağılımı sırasıyla 1, 50, 250 ve 910 saat için görülmektedir. Boru merkezinden itibaren 1.8 m uzaklıktaki sıcaklık toprak yüzey sıcaklığını göstermektedir. Toprak yüzeyine en yakın ısıl çift 10 cm derinlikte gömülüdür.



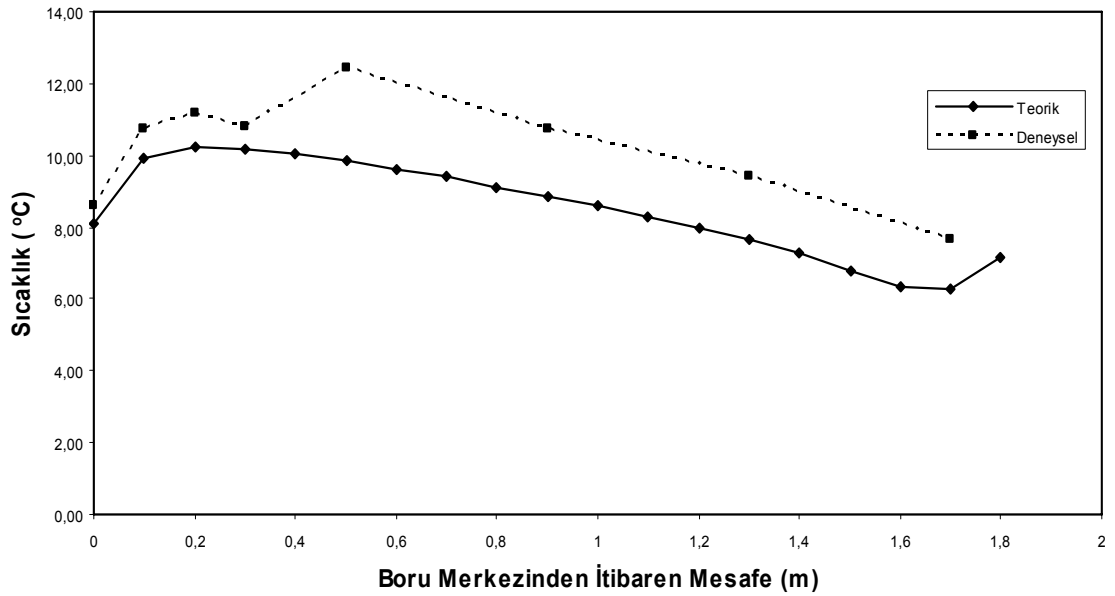
Şekil 6.12 Düşey eksendeki sıcaklık dağılımı (1 saat)



Şekil 6.13 Düşey eksendeki sıcaklık dağılımı (50 saat)

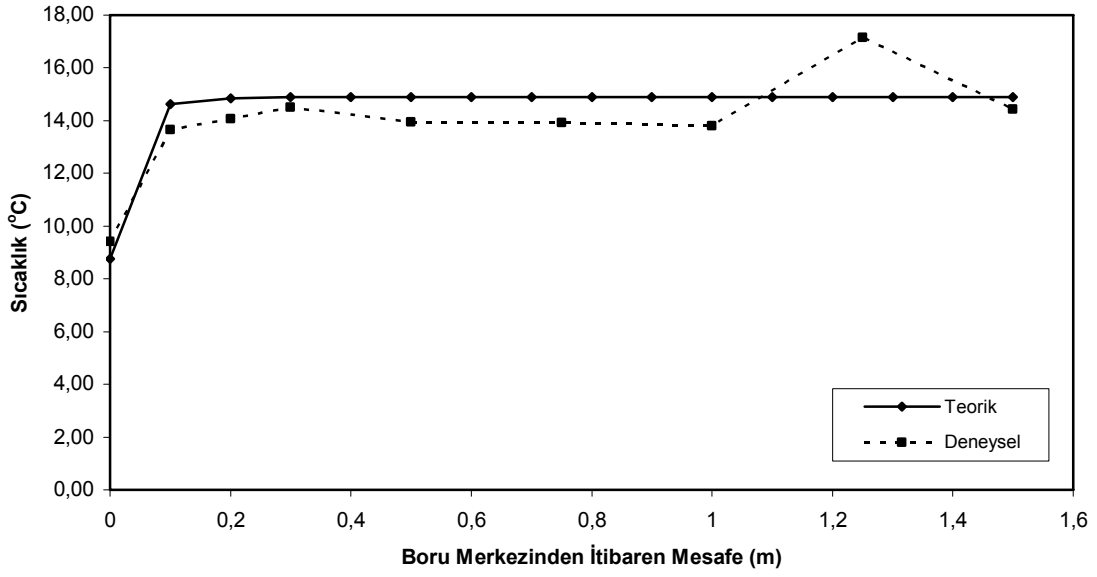


Şekil 6.14 Düşey eksendeki sıcaklık dağılımı (250 saat)

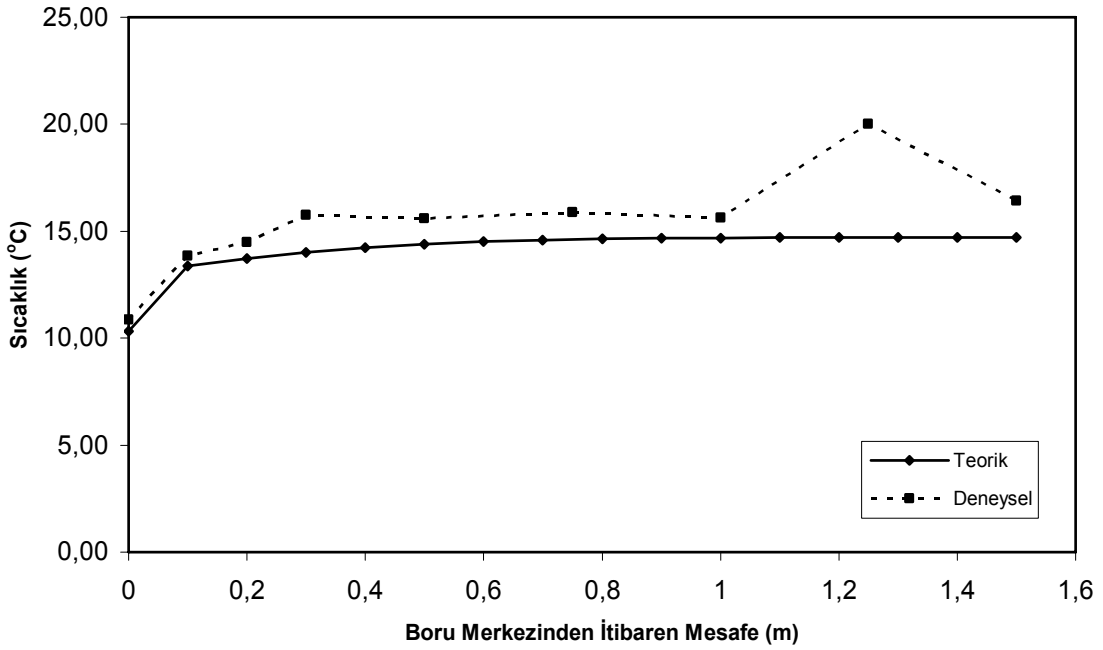


Şekil 6.15 Düşey eksendeki sıcaklık dağılımı (910 saat)

Şekil 6.16, 6.17, 6.18 ve 6.19'da ise ise boru ekseninden itibaren yatay eksendeki sıcaklık dağılımı sırasıyla 1, 50, 250 ve 910 saat için görülmektedir. Burada borular arası 3 m olduğu için grafik 1.5 m için çizilmiştir. Orta noktadan sonra diğer boruya kadar olan sıcaklık dağılımının bu orta noktaya göre simetrik olacağı söylenebilir.

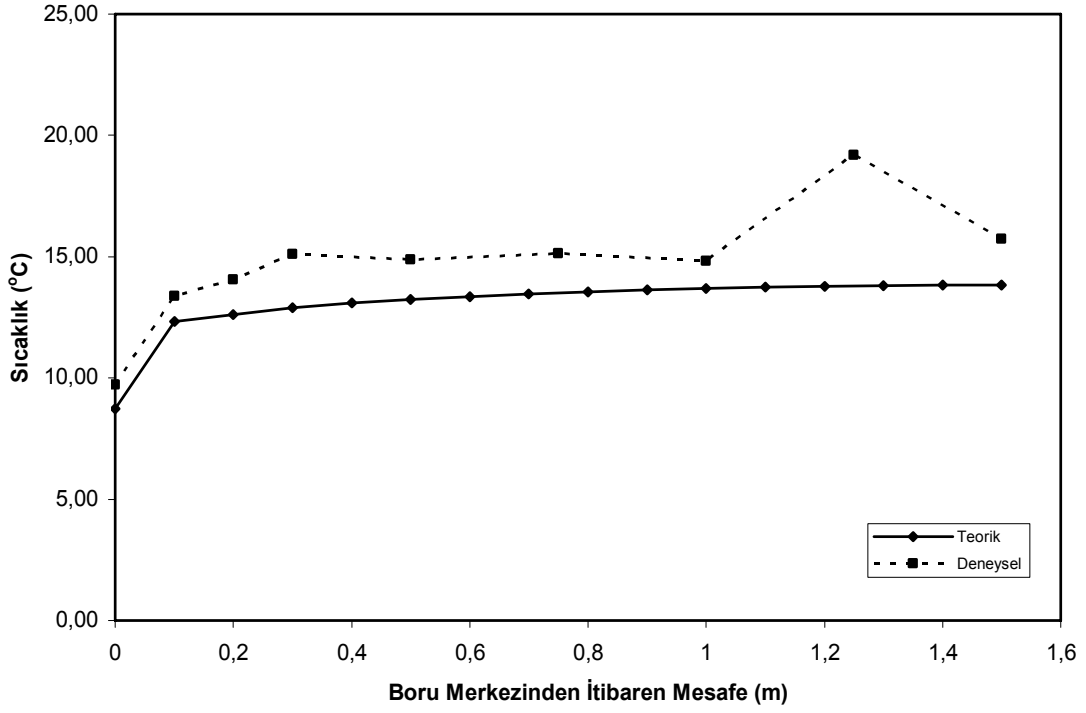


Şekil 6.16 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (1 saat)

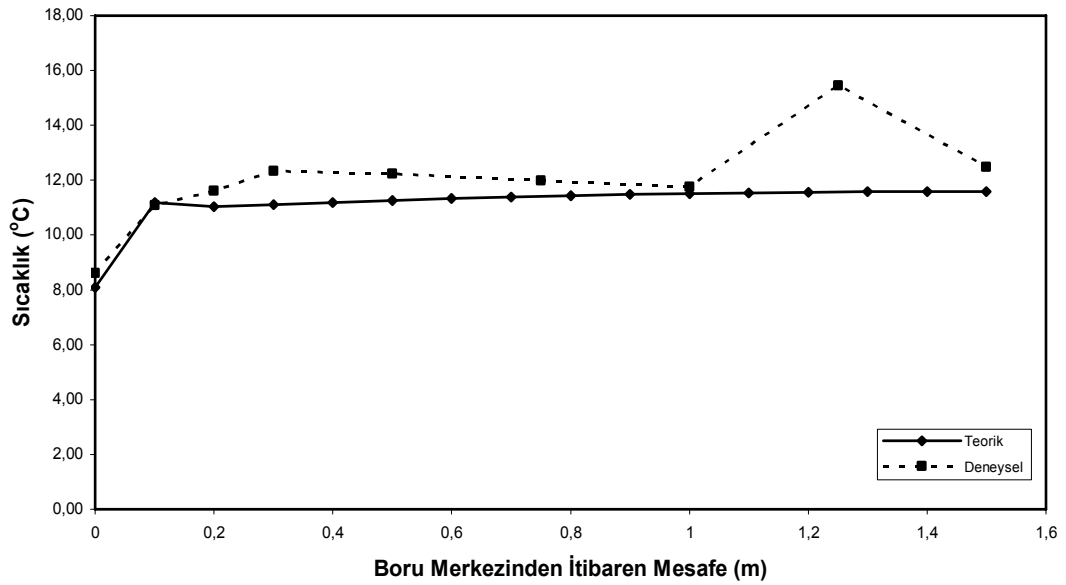


Şekil 6.17 Yatay eksenindeki sıcaklık dağılımı (50 saat)

Boru merkezinden itibaren 1,25 m uzaklıktaki ısı çiftinin tüm deney süresince ölçtüğü sıcaklığın aynı derinlikteki diğer ısı çiftlerinin ölçtüğü sıcaklıktan yaklaşık 4 °C daha fazla olması bu ısı çiftinde bir hata olduğunu göstermektedir. Bunun dışında yataydaki sıcaklık dağılımının beklendiği gibi gerçekleştiği görülmektedir.

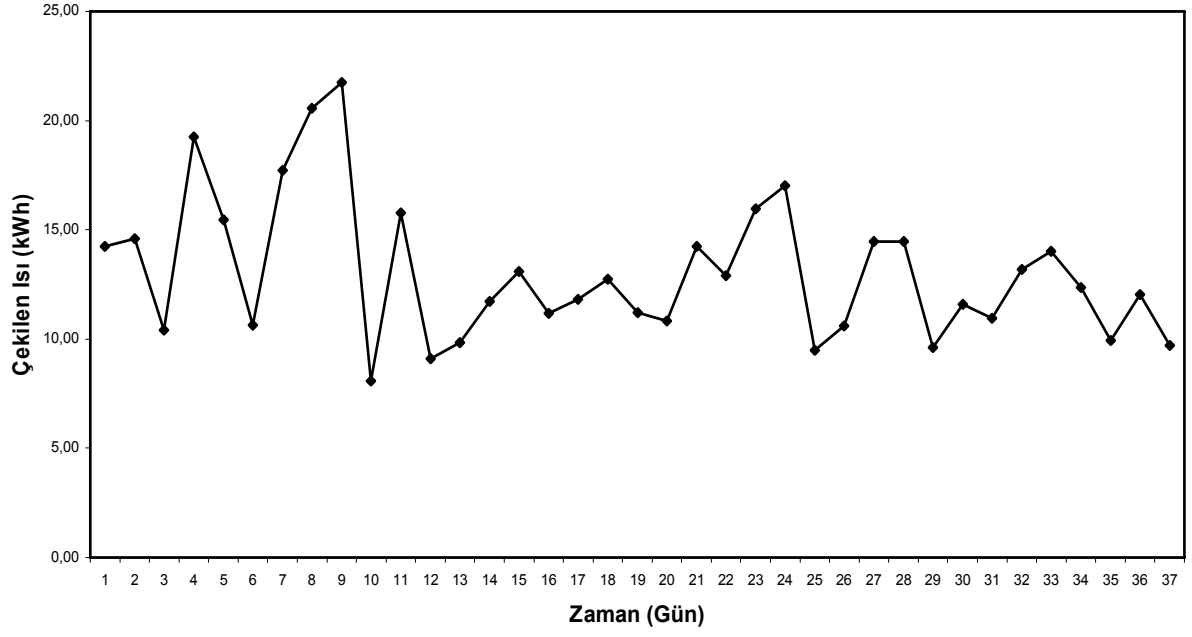


Şekil 6.18 Yatay eksenlerdeki sıcaklık dağılımı (250 saat)

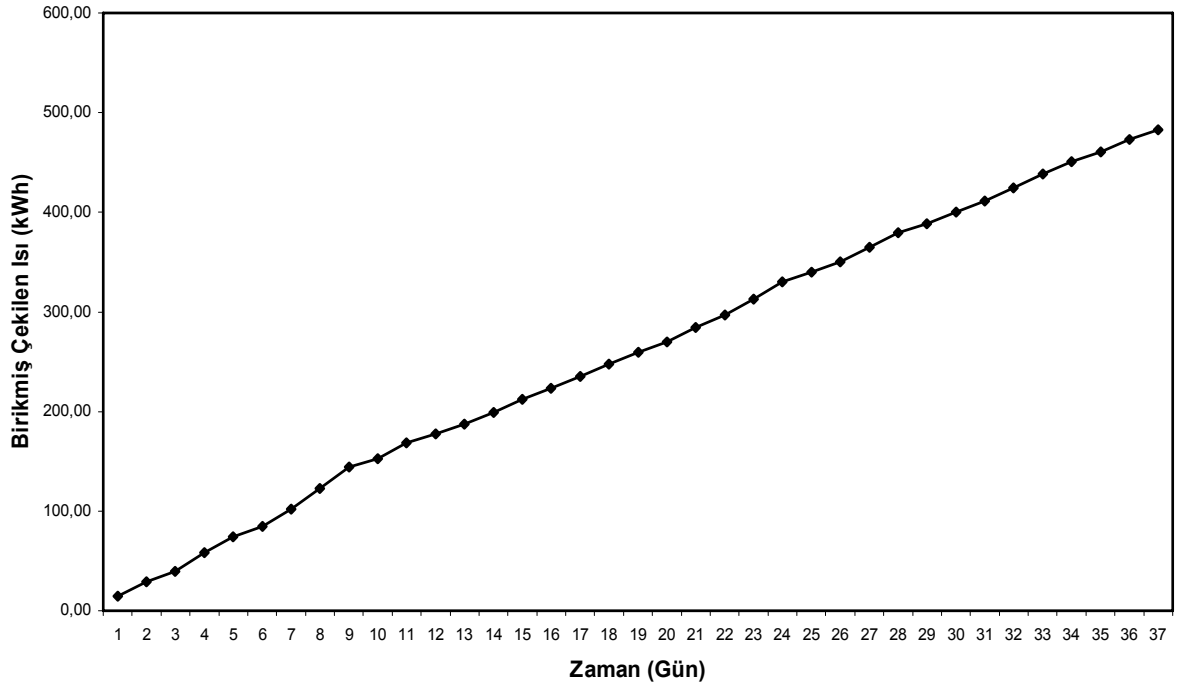


Şekil 6.19 Yatay eksenlerdeki sıcaklık dağılımı (910 saat)

Şekil 6.20 de topraktan çekilen günlük ısı miktarları ve Şekil 6.21 ise topraktan çekilen birikmiş ısı miktarı görülmektedir. 37 gün boyunca topraktan çekilen toplam ısı 482.53 kWh'tir ve günde ortalama 13 kWh ısı çekilmiştir. Birikmiş ısı dağılımından da görüleceği üzere çekilen ısı miktarında zamanla bir azalma görülmemektedir.



Şekil 6.20 Topraktan çekilen günlük ısı miktarı



Şekil 6.21 Topraktan çekilen birikmiş ısı miktarı

#### 6.4 Hata Analizi

Bir parametrenin değerinin ölçülmesinde, sabit hatalar, rasgele hatalar ve imalat hataları sebebiyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı aşağıdaki denklem

yardımıyla hesaplanabilir (Holman, 1971).

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.1)$$

Burada R,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  bağımsız değişkenlerinin verilen bir fonksiyonudur.  $w_1, w_2, \dots, w_n$  ise bağımsız değişkenlerin belirsizliğidir. Deneyde sıcaklık ve debi ölçümü yaptığımız için bu iki değerde yapılacak toplam hatayı bulmamız gerekir.

Sıcaklık ölçümünde ısı çiftlerinden kaynaklanan hata  $\pm 0.3$  °C, kalibrasyon yaptığımız dijital termometreden kaynaklanan hata  $\pm 0.1$  °C, PLC'den dolayı kaynaklanan hata %1 (en yüksek ölçülen sıcaklık 20 °C ve hata  $\pm 0.2$  °C) olduğundan toplam hata (6.1) eşitliği yardımıyla;

$$W_T = \left[ (0.3)^2 + (0.1)^2 + (0.2)^2 \right]^{1/2} = 0.374 \quad (6.2)$$

olarak bulunur. Bu durumda sıcaklık ölçümünde yaptığımız toplam hata  $\pm 0.374$  °C olacaktır.

Benzer şekilde rotametre debi ölçümü sırasında yapılan toplam hata bulunabilir. Burada okuma hatası rotametre mm ölçekli olduğu için  $\pm 1$  mm hata ile okusak debide yapacağımız hata  $\pm 0.0077$  m<sup>3</sup>/h olacaktır. Öte yandan rotametre hassasiyeti  $\pm 5\%$ 'tir ve bu 2 m<sup>3</sup>/h maksimum debi için  $\pm 0.1$  m<sup>3</sup>/h mertebesindedir. Toplam hata ise;

$$W_T = \left[ (0.0077)^2 + (0.1)^2 \right]^{1/2} = 0.10029 \quad (6.3)$$

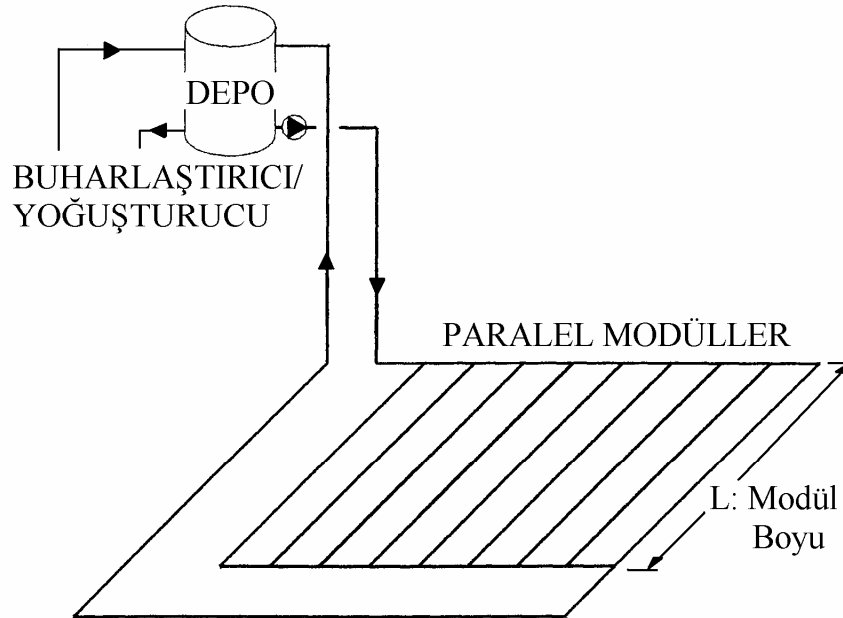
bulunur. Debi ölçümünde yapılan toplam hata  $\pm 0.1$  m<sup>3</sup>/h olarak alınabilir. Burada okumadan kaynaklanan hata ihmal edilebilecek seviyededir.



## 7. TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN TERMOEKONOMİK İNCELEMESİ

### 7.1 Yatay Borulu Toprak Isı Değiştiricisinin Termoekonomik İncelemesi

Toprak kaynaklı ısı pompasının sadece toprak ısı değiştiricisini inceleyecek olursak toprak ısı değiştiricisi devresi Şekil 7.1’de görüldüğü gibi paralel bağlı L uzunluğunda n adet modülden oluşmaktadır. Akışkan bir sirkülasyon pompası yardımıyla toprak devresi içerisinde dolaştırılır. Her modülde  $\dot{m}_a$  debisine sahip akışkan dolaşmaktadır. Bu modüller giriş ve çıkış kolektörlerine bağlıdır. Kolektördeki akışkanın debisi  $n.\dot{m}_a$ ’dir. Devredeki akışkan sıvı fazdadır ve devreye giriş sıcaklığı  $T_{a,g}$  ve devreyi terk ediş sıcaklığı  $T_{a,\ç}$ ’dir.



Şekil 7.1. Paralel borulu toprak ısı değiştiricisi devresi

Toprak devresinde şu kabuller yapılmıştır:

- Toprak modüllerindeki toprak özellikleri ( $k_t$ ,  $\alpha_t$ ) işletme süresince sabittir,
- Nem, toprak yoğunluğu, üst tabaka örtüsü gibi toprak özelliklerini değiştirecek etkenler göz ardı edilmiştir,
- Yersel basınç kayıpları ihmal edilmiştir,
- Toprak devresinde dolaşan akışkanın özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi göz önüne alınmamış ve tek bir değer kullanılmıştır,

Toprak kaynaklı ısı pompalarında en önemli problem ısı değiştiricisinin boyutlandırılması sırasında ortaya çıkmaktadır. Toprağa verilen veya topraktan çekilen ısı için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir (Koyun, 2001).

$$Q = \dot{m}_a C_p (T_t - T_{a,g}) \left[ 1 - e^{\frac{-k_t F(z)L}{\dot{m}_a C_{pa}}} \right] \quad (7.1)$$

Burada;

- $T_t$  : Toprak sıcaklığı (°C),  
 $T_{a,g}$  : Akışkan giriş sıcaklığı (°C),  
 $T_{a,ç}$  : Akışkan çıkış sıcaklığı (°C),  
 $C_{pa}$  : Akışkanın sabit basınçtaki özgül ısısı (kJ/kg K),  
 $L$  : Boru boyu (m),  
 $\dot{m}_a$  : Akışkan kütleli debisi (kg/s),  
 $k_t$  : Toprağın ısı iletim katsayısı (W/m K)'dir.

Topraktan çekilen veya toprağa verilen ısı miktarı zamanla azalmaktadır ve bu nedenle başlangıçta yapılan seçim işletme zamanının son gününe göre yapılırsa daha önceki zaman dilimi için gereğinden daha büyük boyutlandırılmasına neden olacaktır. Bu amaçla toprağa verilen ısı eşitliğinde bir düzenleme yapılarak işletme süresine bağlı olarak topraktan aktarılan ısı miktarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Böylece tüm işletme süresince aktarılan ısı miktarında bir değişiklik olmamış ve işletme süresince tek bir ısı miktarına göre hesaplama yapma imkânı bulunmuştur. Toprağa aktarılan veya topraktan çekilen ortalama ısı için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$Q_{ort} = n \dot{m}_a C_p (T_t - T_{s,g}) \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{r=t} \left[ e^{\frac{-k_t F(z)L}{\dot{m}_a C_{pa}}} \right]}{r} \right] \quad (7.2)$$

Burada;

- $n$  : Toprak devresi modül sayısı'dır.

### 7.1.1 Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonunun oluşmasında şahin ve Kodal (1999) tarafından kullanılan sonlu zaman termoekonomik optimizasyon modelinden faydalanılmıştır. Sonlu zaman termodinamiği kullanarak toprak kaynaklı ısı pompası sisteminden minimum toplam maliyetle maksimum ısı

aktarımı veriminin elde edilmesi amaçlanmıştır. Toplam maliyet olarak yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınmış ve optimize edilmesi amaçlanan fonksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$F_{ref} = \frac{Q_{ort}}{(C_i + C_e)} \quad (7.3)$$

Burada;

$C_i$  : Yatırım maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl),  
 $C_e$  : Yıllık enerji (işletme) maliyeti (para/yıl)'dir.

$F_{ref}$ 'i sözlü olarak ifade etmek gerekirse toplam maliyet yıllık yıpranma payı birim bedeli karşısında sağlanabilecek faydalı ısı geçiştir.

#### 7.1.1.1 Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı ( $C_i$ )

Yıllık yatırım maliyeti olarak toprak ısı değiştiricisini oluşturan devre elemanları ve bunların kurulum masrafları göz önüne alınmıştır. Bunlar, pompa; boru, bağlantı elemanı, vana gibi devre elemanları ve hafriyat maliyetleridir. Sonuç olarak  $C_i$ ;

$$C_i = C_{i-pompa} + C_{i-boru} + C_{i-hafriyat} \quad (7.4)$$

şeklinde ifade edilir.

$C_i$  yatırım maliyeti yıllık yıpranma payını oluşturan unsurları ayrı ayrı ele alalım.

##### 7.1.1.1.1 Pompa Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Akışkanı toprak ısı değiştiricisinde dolaştırmak için gerekli dolaşım pompası yatırım maliyeti yıllık yıpranma payıdır.

$$C_{i-pompa} = b_1 W \quad (7.5)$$

Burada;

$W$  : Pompa gücü (kW),  
 $b_1$  : Pompa birim güç maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl kW)'dir.

$$b_1 = M_{pompa} P \quad (7.6)$$

Burada;

$M_{pompa}$  : Birim güç için pompa maliyeti (para/kW),  
 $P$  : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Yıllık sermaye geri kazanım faktörü, yapılan yatırımın kendini amorti etmesi planlanan

zamana ve yıllık faize bağılı olarak, senelik yıpranma payının hesaplanmasında kullanılan katsayıdır.

$$P = \frac{i(1+i)^v}{(1+i)^v - 1} \quad (7.7)$$

Burada;

$i$  : Faiz oranı,

$v$  : Yıl olarak proje ömrü veya sistemin kendini amorti etmesi istenilen süre'dir.

#### 7.1.1.1.2 Toprak Devresi Boru Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Toprak ısı değiştiricisi maliyeti olarak sadece toprak devresi boru maliyetleri hesaba katılmıştır. Gerçekte toprak devresini oluşturan kolektörler, fittings ve işçilik gibi giderler bir % artırımla boru maliyetine eklenerek hesaba dâhil edilmiştir. Toprak devresi boru yatırım maliyeti toprak ısı değiştiricisi toplam yüzey alanı maliyetinin yıllık yıpranma payına eşittir.

$$C_{i-boru} = a_{boru} A_{boru} \quad (7.8)$$

Burada;

$a_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m<sup>2</sup> yıl),

$A_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru yüzey alanı (m<sup>2</sup>)'dir.

Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti yıllık yıpranma payı ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$a_{boru} = M_{boru} P \quad (7.9)$$

Burada;

$M_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti (para/m<sup>2</sup>),

$P$  : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Toprak ısı değiştiricisi toplam boru yüzey alanı ise;

$$A_{boru} = n\pi dL \quad (7.10)$$

ile ifade edilebilir. Burada;

$d$  : Boru çapı (m),

$L$  : Modül boru uzunluğu (m),

$n$  : Modül sayısı'dır.

(7.9) eşitliği (7.8)'de yerine yazılırsa;

$$C_{i-boru} = a_{boru} n \pi d L \quad (7.11)$$

eşitliği elde edilir.

$M_{boru}$  ifadesi farklı çap borularda farklı değerlere sahiptir. Bu sebeple bu değer koşullu olarak ifade edilmelidir. Çünkü

$$\frac{d(a_{boru})}{d(d)} \neq 0 \text{ ve } \frac{d(a_{boru})}{d(L)} \cong 0 \quad (7.12)$$

Çap büyüdükçe birim boy fiyatı büyümektedir ve çap büyüdükçe birim alan boru boyu azalmaktadır. Bu sebeple  $M_{boru}$  farklı boru çapları için hesaplanmalıdır. Bu hesaplama Çizelge 7.1'den yararlanılarak yapılabilir.

Çizelge 7.1  $M_{boru}$  hesaplama cetveli

I	II	III	IV	V	VI	VII
d (m)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Birim boy fiyatı (para/m)	Özel elemanlar (para/m)	Birim boy işçiliği (para/m)	Birim alan fiyatı ( $a_{boru}$ ) (para/m <sup>2</sup> )
0.01875	1	16.98	A	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -a	(III*(IV+V+VI)/II)
0.025	1	12.73	B	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -b	(III*(IV+V+VI)/II)
0.03125	1	10.19	C	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -c	(III*(IV+V+VI)/II)
0.0375	1	8.49	D	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -d	(III*(IV+V+VI)/II)
0.05	1	6.37	E	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -e	(III*(IV+V+VI)/II)
0.075	1	4.24	F	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -f	(III*(IV+V+VI)/II)
0.1	1	3.18	G	IV*% $\alpha$	IV*% $\beta$ -g	(III*(IV+V+VI)/II)

Farklı çapların biri birine göre oranları ise Çizelge 7.2'de verilmiştir. Birim alan fiyatlandırmasında ana etken birim boy fiyatıdır.

Bu sebeple hesaplamalarda gerçeğe yakın bir yaklaşım yapılması amacıyla güncel boru birim boy fiyatlarının kullanılarak orantılama yapılması gereklidir.

Çizelge 7.2 Boru çapına göre yaklaşık  $a_{\text{boru}}$  oranları

d (m)	$a_{\text{boru}}$ *oran (para/m <sup>2</sup> yıl)
0.01875	$a_{\text{boru}}$ *1.00
0.025	$a_{\text{boru}}$ *1.11
0.03125	$a_{\text{boru}}$ *1.28
0.0375	$a_{\text{boru}}$ *1.45
0.05	$a_{\text{boru}}$ *1.50
0.075	$a_{\text{boru}}$ *1.94
0.1	$a_{\text{boru}}$ *2.29

### 7.1.1.1.3 Toprak Devresi Hafriyat Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Toprak ısı değiştiricileri toprak altında belirli bir derinlikte gömülmek zorundadır. Yatay tip toprak ısı değiştiricilerinin dikey tip toprak ısı değiştiricilerine karşı en büyük dezavantajı gömme işleminin için gerekli olan hafriyat işlemdir. Yatay tip toprak ısı değiştiricilerinde topraktan alınan/verilen ısıya karşılık hafriyat maliyetleri bu sistemlerin rekabet kabiliyetini engellemektedir. Burada hafriyat maliyetleri olarak sadece toprak ısı değiştiricisi borularının hafriyat alanlarının maliyetleri hesaba katılmış ve kolektörler için gerekli hafriyat maliyetleri ihmal edilmiştir. Toprak devresi hafriyat maliyeti toprak ısı değiştiricisi toplam hafriyat alanı maliyetinin yıllık yıpranma payına eşittir.

$$C_{i-\text{hafriyat}} = a_{\text{hafriyat}} A_{\text{hafriyat}} \quad (7.13)$$

Burada;

$a_{\text{hafriyat}}$  : Derinlik ve boy birim kesit alan hafriyat maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m<sup>2</sup> yıl),

$A_{\text{hafriyat}}$  : Toprak ısı değiştiricisi hafriyat derinlik kesit alanı (m<sup>2</sup>)'dır.

Derinlik ve boy birim kesit alan hafriyat maliyeti yıllık yıpranma payı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a_{\text{hafriyat}} = M_{\text{hafriyat}} P \quad (7.14)$$

Burada;

$M_{\text{hafriyat}}$  : Derinlik ve boy birim kesit alan maliyeti (para/m<sup>2</sup>),

P : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Toprak ısı değiştiricisi hafriyat derinlik kesit alanı ise;

$$A_{hafriyat} = nhL \quad (7.15)$$

ile ifade edilebilir. Burada;

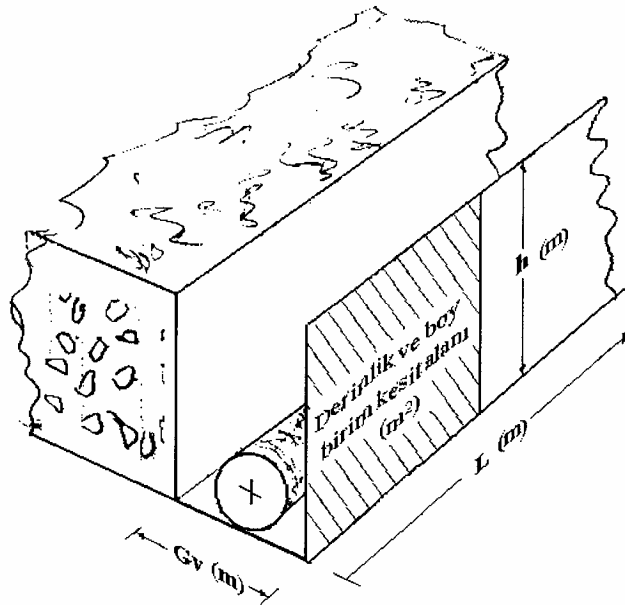
h : G6mme derinliği (m),  
L : Mod6l boru uzunluğu (m),  
n : Mod6l sayısı'dır.

(7.15) eşitliği (7.13)'da yerine yazılırsa;

$$C_{i-hafriyat} = a_{hafriyat} nhL \quad (7.16)$$

eşitliği elde edilir.

Burada derinlik ve boy birim kesit alan hafriyat maliyetinin hesaplanması gereklidir. Derinlik ve boy birim kesit alan tanımlaması amaç fonksiyonda birim uyuşmazlığı gerçekleşmemesi için t6retilen bir ifadedir. Gerçekte hafriyat hacimsel olarak boyutlandırılır. Ancak kullanılan kepçe ağzının sabit olması sebebiyle sadece g6mme derinliği ve mod6l uzunluğuna bağlıdır. Bu sebeple hacimsel ifadeyi alan olarak ifade etmek m6mk6nd6r. Şekil 7.2'de yatay tip toprak ısı değiştiricisinin toprak altındaki yerleşimi ve derinlik ve boy birim kesit alanı ifadesi g6r6lmektedir.



Şekil 7.2 Hafriyat değişkenleri

$$M_{hafriyat} = G_v BHM \quad (7.17)$$

Burada;

BHM : Birim hacim hafriyat maliyeti (para/m<sup>3</sup>),

G<sub>v</sub> : Hafriyat (kepçe ağız) genişliği (m)'dir.

Hafriyat yıpranma payı hesaplanmasında  $\frac{d(BHM)}{d(h)} \neq 0$  kabulü yapılmıştır.  $\frac{d(BHM)}{d(h)} \neq 0$

olduğu hallerde derinliğe bağlı olarak koşullu değerlendirme yapılmalıdır.

### 7.1.1.2 Yıllık Enerji (İşletme) Maliyeti (C<sub>e</sub>)

Yıllık işletme maliyeti toprak kaynaklı ısı değiştiricisinde ısı taşıyıcı akışkanı dolaştıran sirkülasyon pompası tarafından işletme süresince kullanılan enerji bedelidir.

$$C_e = b_2 W \quad (7.18)$$

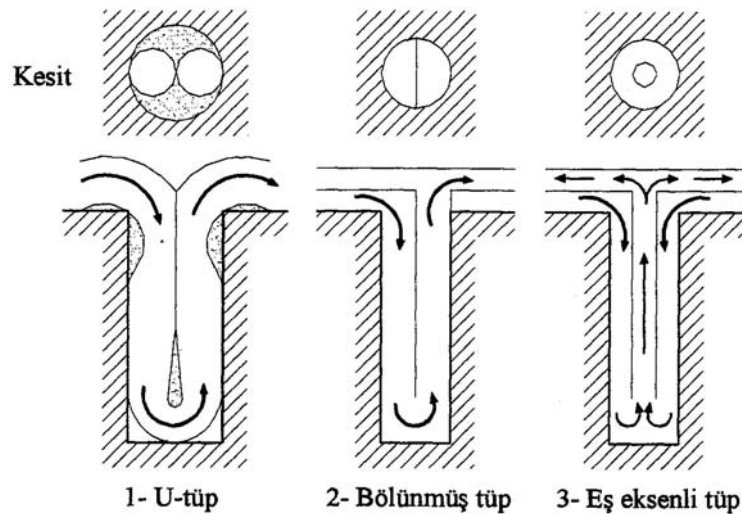
Burada;

b<sub>2</sub> : Birim enerji için yıllık işletme saatleri bedeli (para/yıl kW),

W : Pompa gücü (kW)'dir.

## 7.2 Düşey Borulu Toprak Isı Değiştiricisinin Termoekonomik İncelemesi

Düşey borulu toprak ısı değiştiricisinin yatay borulu toprak ısı değiştiricisinden farkı boruların toprağa açılan derin kuyuların içine yerleştirilmesidir. Yatay borulu toprak ısı değiştiricilerine göre daha az yüzey alanı gerektirir. Bahçe alanı yetersiz olan yerlerde kullanılması daha uygundur.



Şekil 7.3 Farklı türde yatay borulu ısı değiştiricileri



Kuyular genellikle 20-200 m derinlikte açılır. Bu çukurlara U boru veya eş merkezli boru yerleştirilir. Her bir kuyuya tek bir U boru yerleştirilebileceği gibi birden fazla da U boru yerleştirmek mümkündür. Ancak boruların biri birlerini etkilemesi söz konusudur. Şekil 7.3’de yatay borulu ısı değiştiricisi türleri görülmektedir.

Bizim optimizasyonunu yapacağımız sistemde toprak ısı değiştiricisi devresi her biri farklı kuyularda L boyunda n adet U borudan oluşmaktadır. Akışkan bir sirkülasyon pompası yardımıyla toprak devresi içerisinde dolaştırılır. Her modülde  $\dot{m}_a$  debisine sahip akışkan dolaşmaktadır. Bu modüller giriş ve çıkış kolektörlerine bağlıdır ve paralel olarak çalışmaktadır. Kolektördeki akışkanın debisi  $n.\dot{m}_a$ ’dır. Devredeki akışkan sıvı fazdadır ve ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı  $T_{a,g}$  ve devreyi terk ediş sıcaklığı  $T_{a,\ç}$ ’dir.

Toprak devresinde şu kabuller yapılmıştır:

- Toprak modüllerindeki toprak özellikleri ( $k_t$ ,  $\alpha_t$ ) işletme süresince sabittir,
- Nem, toprak yoğunluğu, üst tabaka örtüsü gibi toprak özelliklerini değiştirecek etkenler göz ardı edilmiştir,
- Yersel basınç kayıpları ihmal edilmiştir,
- Toprak devresinde dolaşan akışkanın özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi göz önüne alınmamış ve tek bir değer kullanılmıştır,
- U borulardaki ısı geçişi incelenirken eşdeğer çap yaklaşımından yararlanılarak tek boru gibi düşünülerek hesaplar yapılmıştır,
- Boru boyu eşdeğer çapa göre bulunan boru boyunun iki katıdır,
- Basınç kayıpları ve pompa gücü hesaplanırken bu son bulunan boy esas alınmıştır.

Toprak kaynaklı ısı pompalarında en önemli problem ısı değiştiricisinin boyutlandırılması sırasında ortaya çıkmaktadır. Birim boru boyunda toprağa verilen veya topraktan çekilen ısı için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir (Koyun, 2001).

$$q = k_t(T_t - T_{a,g})F(z)e^{\frac{-k_t F(z)L}{\dot{m}_a C_{pa}}} \quad (7.19)$$

Burada;

- $T_t$  : Toprak sıcaklığı (°C),  
 $T_{a,g}$  : Su giriş sıcaklığı (°C),  
 $C_{pa}$  : Suyun sabit basınçtaki özgül ısısı (kJ/kg K),  
 $L$  : Boru boyu (m),  
 $\dot{m}_a$  : Akışkan kütleli debisi (kg/s),

$k_t$  : Toprağın ısı iletim katsayısı (W/m K)'dir.

Ayrıca burada toprak sıcaklığı da derinliğe bağlı olarak sürekli değiştiğinden birim boyda topraktan çekilen veya toprağa verilen ısı miktarı derinliğe bağlı olarak değişecektir. Toprak sıcaklığındaki bu değişim (7.20) eşitliğiyle verilmektedir.

$$T(x, t) = T_{t,ort} + T_{t,gen} e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}}} \cos \left( 2\pi \frac{t}{P} - x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}} \right) \quad (7.20)$$

Burada;

$T_{t,ort}$  : Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{t,gen}$  : Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $x$  : Gömme derinliği (m),  
 $t$  : Periyot başlangıcından itibaren süre (s),  
 $P$  : Periyot (s),  
 $\alpha_t$  : Toprağın ısı yayıcılığı ( $\text{m}^2/\text{s}$ )'dir.

(7.20) eşitliğini (7.19)'da yerine yazıp integre etmemiz gereklidir. Bunun için gerekli sadeleştirmeler yapılarak ve sabit değişkenler bir araya toplanıp ortak bir değişken atanarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$q = A[E + Fe^{-Cx} \text{Cos}(D - Cx) - G]e^{-Bx} \quad (7.21)$$

$$A = k_t \cdot F(z) \quad (7.22)$$

$$B = \frac{-k_t F(z)}{\dot{m}_a C_{p_a}} \quad (7.23)$$

$$C = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_t P}} \quad (7.24)$$

$$D = 2\pi \frac{t}{P} \quad (7.25)$$

$$E = T_{t,ort} \quad (7.26)$$

$$F = T_{t,gen} \quad (7.27)$$

$$G = T_{a,g} \quad (7.28)$$

Yukarıdaki ifadeyi L boru boyunca integre edersek;

$$\int_0^L q = \int_0^L A[E + Fe^{-Cx} \text{Cos}(D - Cx) - G]e^{-Bx} .dx \quad (7.29)$$

aşağıdaki ifadeyi elde etmiş oluruz. Bu bize boru boyunca toplam aktarılan ısı miktarını vermektedir.

$$Q = \frac{AE}{B}(1 - e^{-BL}) + \frac{AG}{B}(e^{-BL} - 1) + \dots$$

$$\frac{AF}{(C+B)^2 + C^2} \left[ e^{-(C+B)L} (C \text{Sin}(D - CL) + (C+B) \text{Cos}(D - CL)) + (C \text{Sin}D + (C+B) \text{Cos}D) \right] \quad (7.30)$$

Topraktan çekilen veya toprağa verilen ısı miktarı zamanla azalmaktadır ve bu nedenle başlangıçta yapılan seçim işletme zamanının son gününe göre yapılırsa daha önceki zaman dilimi için gereğinden daha büyük boyutlandırılmasına neden olacaktır. Bu amaçla toprağa verilen ısı eşitliğinde bir düzenleme yapılarak işletme süresine bağlı olarak topraktan aktarılan ısı miktarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Böylece tüm işletme süresince aktarılan ısı miktarında bir değişiklik olmamış ve işletme süresince tek bir ısı miktarına göre hesaplama yapma imkânı bulunmuştur. Toprağa aktarılan veya topraktan çekilen ortalama ısı için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$Q_{ort} = n \frac{\sum_{i=1}^{r=t} Q_i}{r} \quad (7.31)$$

Burada;

n : Toprak devresi modül sayısı'dır.

### 7.2.1 Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonunun oluşmasında Şahin ve Kodal (1999) tarafından kullanılan sonlu zaman termoekonomik optimizasyon modelinden faydalanılmıştır. Sonlu zaman termodinamiği kullanarak toprak kaynaklı ısı pompası sisteminden minimum toplam maliyetle maksimum ısı aktarımı veriminin elde edilmesi amaçlanmıştır. Toplam maliyet olarak yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınmış ve optimize edilmesi amaçlanan fonksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$F_{ref} = \frac{Q_{ort}}{(C_i + C_e)} \quad (7.32)$$

Burada;

$C_i$  : Yatırım maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl),  
 $C_e$  : Yıllık enerji (işletme) maliyeti (para/yıl)'dir.

$F_{ref}$ 'i sözlü olarak ifade etmek gerekirse toplam maliyet yıllık yıpranma payı birim bedeli karşısında sağlanabilecek faydalı ısı geçiştir.

### 7.2.1.1 Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı ( $C_i$ )

Yıllık yatırım maliyeti olarak toprak ısı değiştiricisini oluşturan devre elemanları ve bunların kurulum masrafları göz önüne alınmıştır. Bunlar, pompa; boru, bağlantı elemanı, vana gibi devre elemanları ve sondaj maliyetleridir. Sonuç olarak  $C_i$ ;

$$C_i = C_{i-pompa} + C_{i-boru} + C_{i-sondaj} \quad (7.33)$$

şeklinde ifade edilir.

$C_i$  yatırım maliyeti yıllık yıpranma payını oluşturan unsurları ayrı ayrı ele alalım.

#### 7.2.1.1.1 Pompa Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Akışkanı toprak ısı değiştiricisinde dolaştırmak için gerekli dolaşım pompası yatırım maliyeti yıllık yıpranma payıdır.

$$C_{i-pompa} = b_1 W \quad (7.34)$$

Burada;

$W$  : Pompa gücü (kW),  
 $b_1$  : Pompa birim güç maliyeti yıllık yıpranma payı (para/yıl kW)'dir.

$$b_1 = M_{pompa} P \quad (7.35)$$

Burada;

$M_{pompa}$  : Birim güç için pompa maliyeti (para/kW),  
 $P$  : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Yıllık sermaye geri kazanım faktörü, yapılan yatırımın kendini amorti etmesi planlanan zamana ve yıllık faize bağlı olarak, senelik yıpranma payının hesaplanmasında kullanılan katsayıdır.

$$P = \frac{i(1+i)^v}{(1+i)^v - 1} \quad (7.36)$$

Burada;

$i$  : Faiz oranı,

$v$  : Yıl olarak proje ömrü veya sistemin kendini amorti etmesi istenilen süre'dir.

#### 7.2.1.1.2 Toprak Devresi Boru Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Toprak ısı değiştiricisi maliyeti olarak sadece toprak devresi boru maliyetleri hesaba katılmıştır. Gerçekte toprak devresini oluşturan kolektörler, fittings ve işçilik gibi giderler bir % artırımla boru maliyetine eklenerek hesaba dâhil edilmiştir. Toprak devresi boru yatırım maliyeti toprak ısı değiştiricisi toplam yüzey alanı maliyetinin yıllık yıpranma payına eşitir.

$$C_{i-boru} = a_{boru} A_{boru} \quad (7.37)$$

Burada;

$a_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m<sup>2</sup> yıl),

$A_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru yüzey alanı (m<sup>2</sup>)'dir.

Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti yıllık yıpranma payı ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$a_{boru} = M_{boru} P \quad (7.38)$$

Burada;

$M_{boru}$  : Toprak ısı değiştiricisi boru birim alan maliyeti (para/m<sup>2</sup>),

$P$  : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Toprak ısı değiştiricisi toplam boru yüzey alanı ise;

$$A_{boru} = n\pi dL \quad (7.39)$$

ile ifade edilebilir. Burada;

$d$  : Boru çapı (m),

$L$  : Modül boru uzunluğu (m),

$n$  : Modül sayısı'dır.

(7.39) eşitliği (7.37)'de yerine yazılırsa;

$$C_{i-boru} = a_{boru} n\pi dL \quad (7.40)$$

eşitliği elde edilir.

$M_{\text{boru}}$  ifadesi farklı çap borularda farklı değerlere sahiptir. Bu sebeple bu değer koşullu olarak ifade edilmelidir. Çünkü

$$\frac{d(a_{\text{boru}})}{d(d)} \neq 0 \text{ ve } \frac{d(a_{\text{boru}})}{d(L)} \cong 0 \quad (7.41)$$

Çap büyüdükçe birim boy fiyatı büyümektedir ve çap büyüdükçe birim alan boru boyu azalmaktadır. Bu sebeple  $M_{\text{boru}}$  farklı boru çapları için hesaplanmalıdır. Bu hesaplama Çizelge 7.1'den yararlanılarak yapılabilir.

Farklı çapların biri birine göre oranları ise Çizelge 7.2'de verilmiştir. Birim alan fiyatlandırmasında ana etken birim boy fiyatıdır.

Bu sebeple hesaplamalarda gerçeğe yakın bir yaklaşım yapılması amacıyla güncel boru birim boy fiyatlarının kullanılarak orantılama yapılması gereklidir.

### 7.2.1.1.3 Toprak Devresi Sondaj Yatırım Maliyeti Yıllık Yıpranma Payı

Düşey toprak ısı değiştiricileri toprak içerisine açılan kuyulara yerleştirilen borulardan oluşmaktadır. Bu nedenle boruları toprağa gömmek için sondaj yapılması gereklidir. Burada sondaj maliyetleri olarak sadece derinlikle değişim ele alınmıştır. Açılan sondaj kuyusunun çapına göre maliyet değişimi hesaba katılmamıştır. Bunun nedeni bizim hesaplamalarımızda kullandığımız boru çapları için gereken kuyuların çapları için maliyetin aynı olmasıdır. Eğer bir kuyuya birden fazla U boru yerleştirilmek istenirse o zaman maliyeti etkileyecek çapta sondaj çapında değişiklikler olmaktadır. Sondaj maliyeti toprak ısı değiştiricisi toplam sondaj maliyetinin yıllık yıpranma payına eşittir.

$$C_{i\text{-sondaj}} = a_{\text{sondaj}} H_{\text{sondaj}} \quad (7.42)$$

Burada;

$a_{\text{sondaj}}$  : Sondaj birim derinlik maliyeti yıllık yıpranma payı (para/m yıl),  
 $H_{\text{sondaj}}$  : Toprak ısı değiştiricisi toplam sondaj boyu (m)'dir.

Sondaj birim derinlik maliyeti yıllık yıpranma payı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a_{\text{sondaj}} = M_{\text{sondaj}} P \quad (7.43)$$

Burada;

$M_{\text{sondaj}}$  : Sondaj birim derinlik maliyeti (para/m),  
 $P$  : Yıllık sermaye geri kazanım faktörü (1/yıl)'dür.

Toplam sondaj boyu ise;

$$H_{\text{sondaj}} = nL \quad (7.44)$$

ile ifade edilebilir. Burada;

L : Eşdeğer çapa göre bulunan boru boyu (m),

n : Modül sayısı'dır.

(7.44) eşitliği (7.42)'da yerine yazılırsa;

$$C_{i\text{-sondaj}} = a_{\text{sondaj}} nL \quad (7.45)$$

eşitliği elde edilir.

### 7.2.1.2 Yıllık Enerji (İşletme) Maliyeti ( $C_e$ )

Yıllık işletme maliyeti toprak kaynaklı ısı değiştiricisinde ısı taşıyıcı akışkanı dolaştıran sirkülasyon pompası tarafından işletme süresince kullanılan enerji bedelidir.

$$C_e = b_2 W \quad (7.46)$$

Burada;

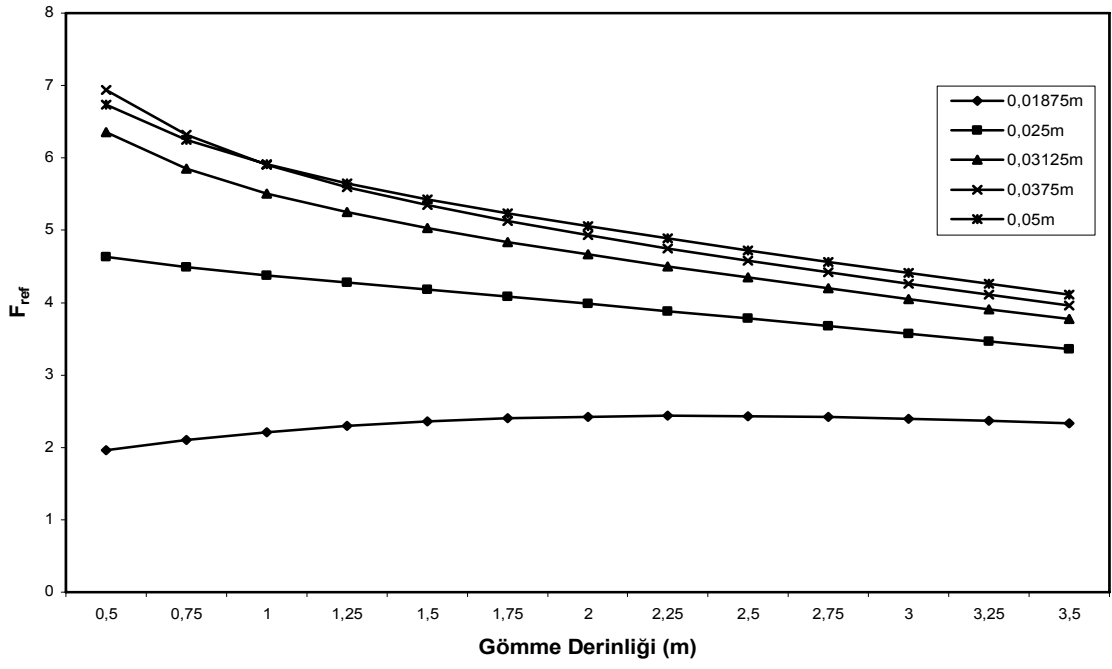
$b_2$  : Birim enerji için yıllık işletme saatleri bedeli (para/yıl kW),

W : Pompa gücü (kW)'dır.

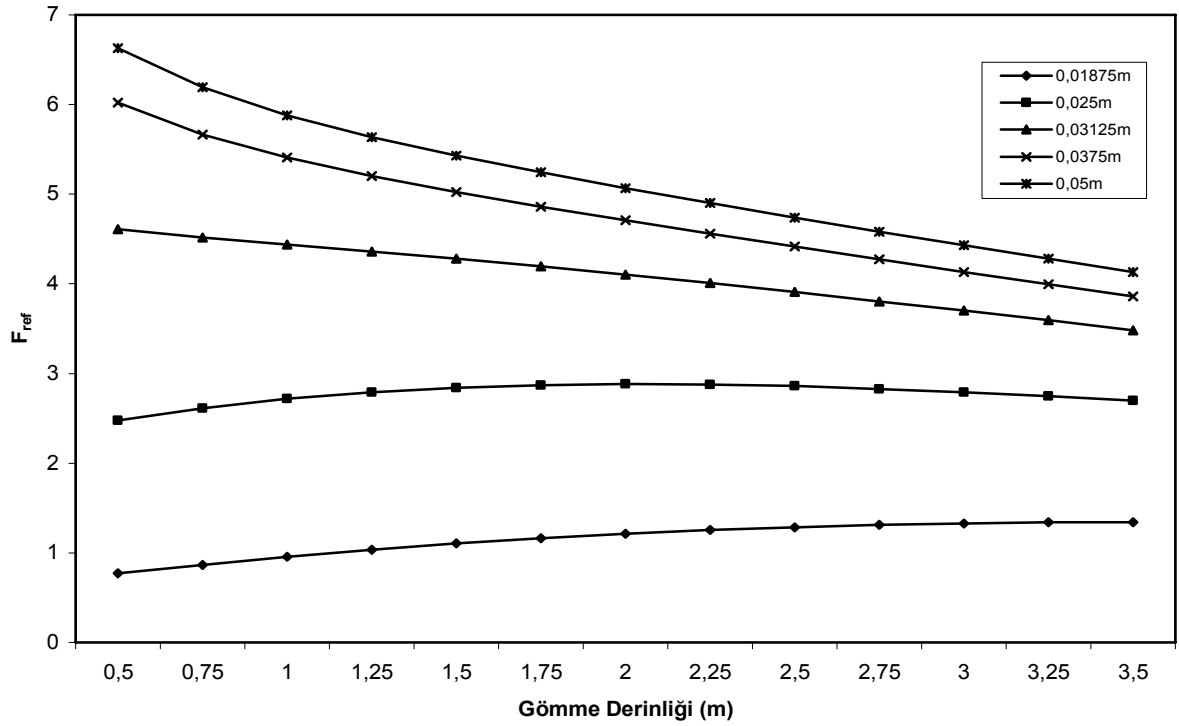
## 7.3 Sonuçlar

Toprak kaynaklı yatay ve düşey borulu ısı değiştiricisinin boyutlandırılmasında kullanılan çeşitli parametrelerin  $F_{\text{ref}}$  fonksiyonu üzerinde etkileri incelenmiştir.

Yatay borulu toprak ısı değiştirici için referans fonksiyonun verilen bir ısıl güç için nasıl değiştiği Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere düşünülenin tam aksine gömme derinliğini artırmak her boru çapı için uygun olmamaktadır. Burada en önemli etken bizim topraktan almak veya toprağa vermek istediğimiz ısı miktarıdır. Isı miktarı, bizim optimum boru çapını ve gömme derinliğini seçmemizdeki en önemli etkidir. Farklı ısıl güçler için farklı boru çapları uygun olmaktadır. Isıl güç arttıkça boru boyu artmakta ve dolayısıyla gerekli hafriyat hacmi de artmaktadır. Ancak derinlikle birlikte toprak sıcaklığındaki olumlu değişim nedeniyle kullanılacak boru boyu da azalmaktadır. Bu nedenle hafriyat hacmindeki derinlikle olan artma ve boru boyundaki kısalma nedeniyle olan azalma arasında bir optimum değer yakalama olanağı vardır. Daha büyük çaplı boruların kullanımının referans fonksiyonu olumlu yönde etkilemesinin nedeni gerekli pompa gücündeki ve boru boyundaki azalmadır. Ancak büyük çapta boruların gömme derinliğini artırmak yukarıdaki etki nedeniyle düşük güçlerde pek avantajlı olmamaktadır.

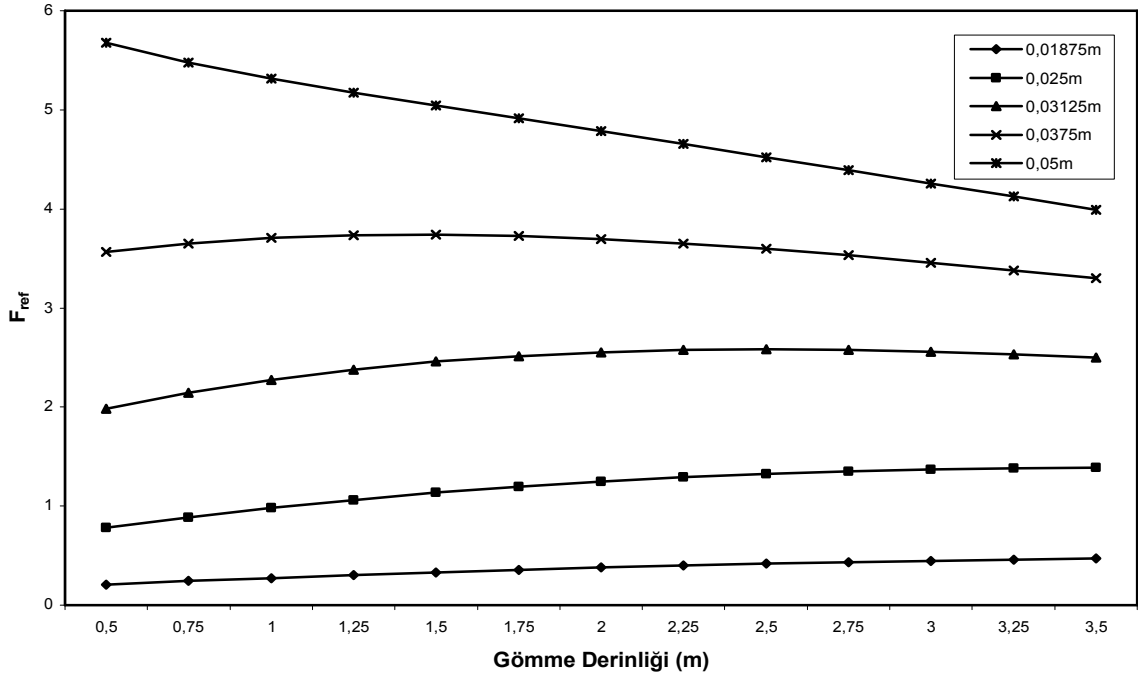


Şekil 7.4  $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=2000$  W)

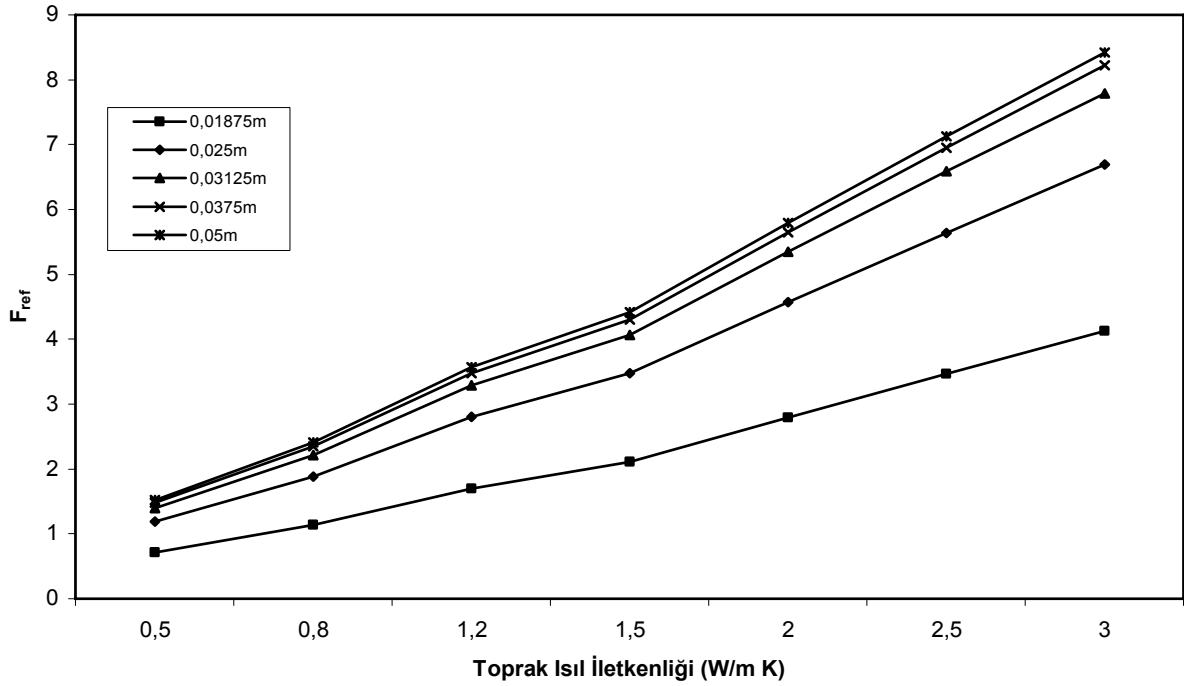


Şekil 7.5  $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=3000$  W)





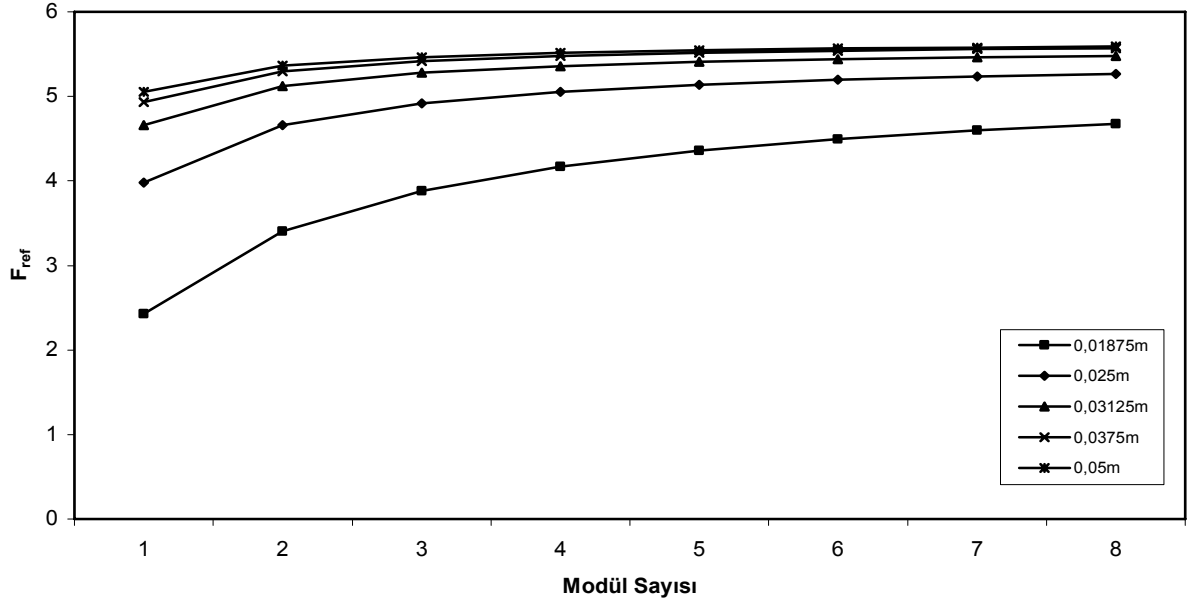
Şekil 7.6  $F_{ref}$ 'in boru çapı ve gömme derinliğine bağlı değişimi ( $Q=5000$  W)



Şekil 7.7  $F_{ref}$ 'in boru çapı ve toprağın ısı iletkenliğine bağlı değişimi

Şekil 7.7'de ise farklı boru çapları için referans fonksiyonunun toprağın ısı iletkenliği ile

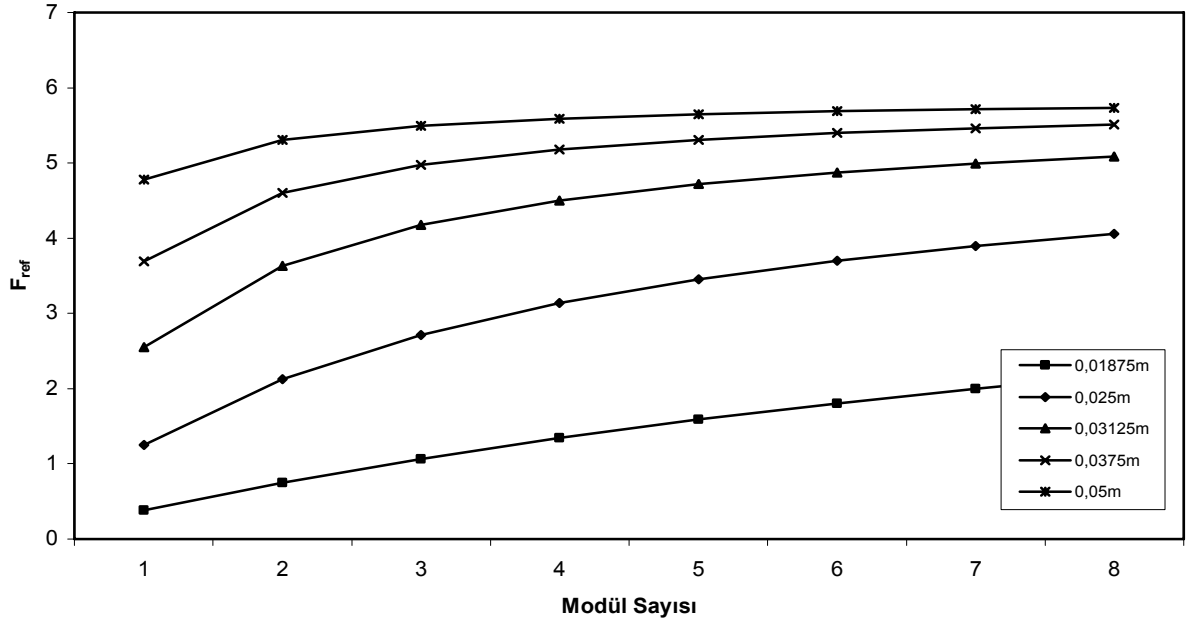
değişimi görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere toprak özellikleri de boyutlandırmada önemli bir değişkendir. Ayrıca daha büyük çaplı borularda daha da önemlidir. Artan boru çapıyla birlikte eğrilerin eğimi de artmaktadır. Buna göre ısı değiştiricisini toprağa gömerken boru çevresini ısıl iletkenliği daha yüksek bir dolgu malzemesi ile doldurmak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayacaktır.



Şekil 7.8  $F_{ref}$ 'in boru çapı ve modül sayısına bağlı değişimi( $Q=2000$  W)

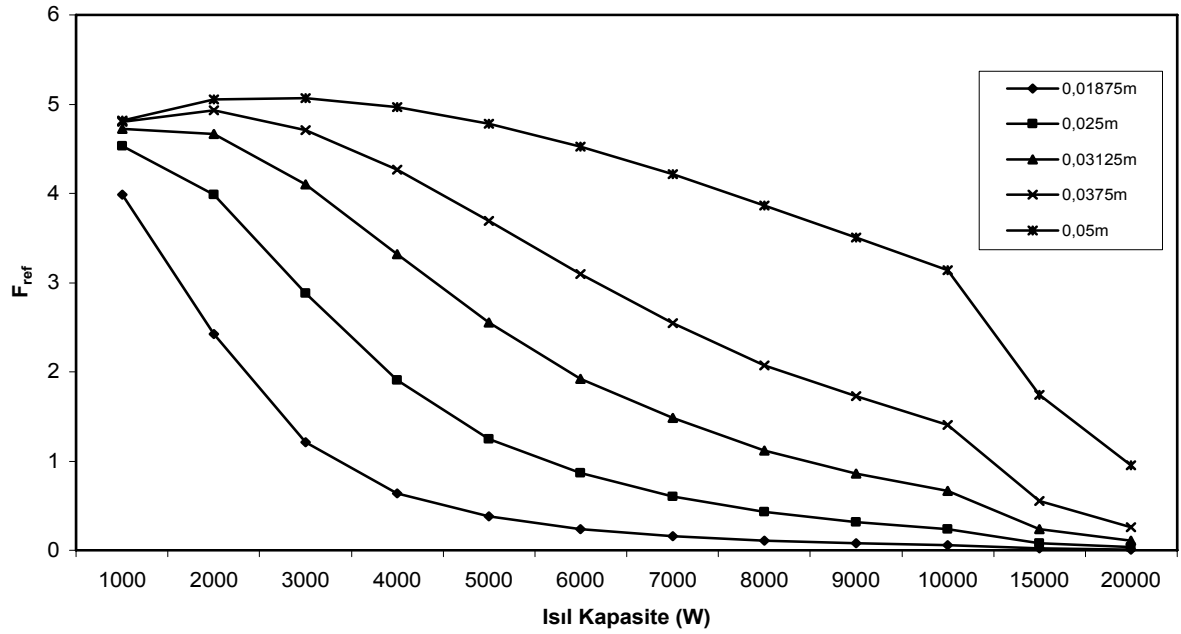
Toprak ısı değiştiricisinde bir diğer önemli etken de paralel boruların uzunluğu ve optimum modül sayısıdır. Bilindiği gibi boru boyu uzadıkça elde edilecek çıkış suyu sıcaklığındaki artış belli bir değere doğru asimptotik olarak yaklaşmaktadır. Yani boru boyunu belli bir değerden sonra arttırmak elde edilecek çıkış suyu sıcaklığında önemli bir artışa neden olmaz. Bu nedenle paralel modüller kullanarak daha kısa boru boyları ve daha verimli toprak ısı değiştiricileri elde edilebilir. Şekil 7.8'de de bu etki açıkça görülmektedir.

Burada da ısıl kapasitenin önemi büyüktür. Şekil 7.8'de 2000 W'lık bir ısı değiştirici göz önüne alınmıştır. Küçük boru çaplarında modül sayısındaki artışın referans fonksiyon üzerindeki etkisi daha fazladır. Ancak ısıl kapasite daha da arttığında büyük çaplı borular için de modül sayısının artmasının referans fonksiyona etkisi artacaktır. Bunun nedeni büyük çaplı borularda, düşük ısıl güçlerde, gerekli olan boru boyunun optimum modül uzunluğuna yakın olmasıdır.



Şekil 7.9 F<sub>ref</sub>'in boru çapı ve modül sayısına bağlı değişimi (Q=5000 W)

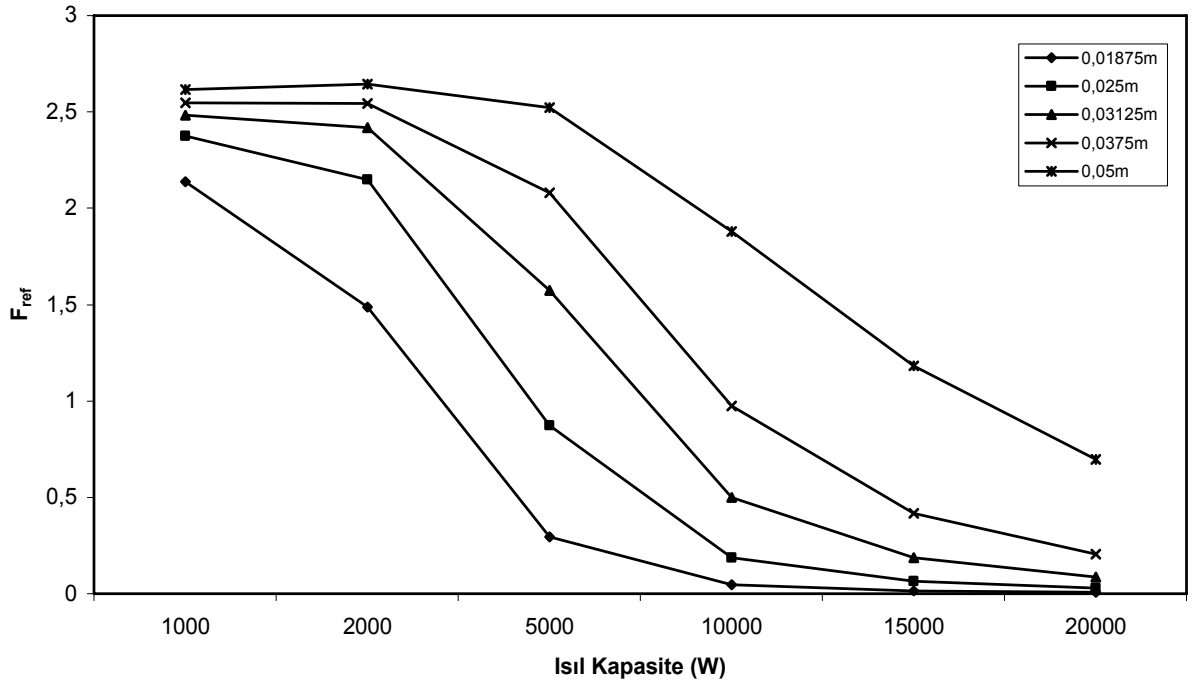
Şekil 7.9'da da ısıtılabilir kapasitenin 5000 W olması durumunda modül sayısının referans fonksiyona etkisi görülmektedir.



Şekil 7.10 F<sub>ref</sub>'in boru çapı ve ısıtılabilir kapasiteye bağlı değişimi

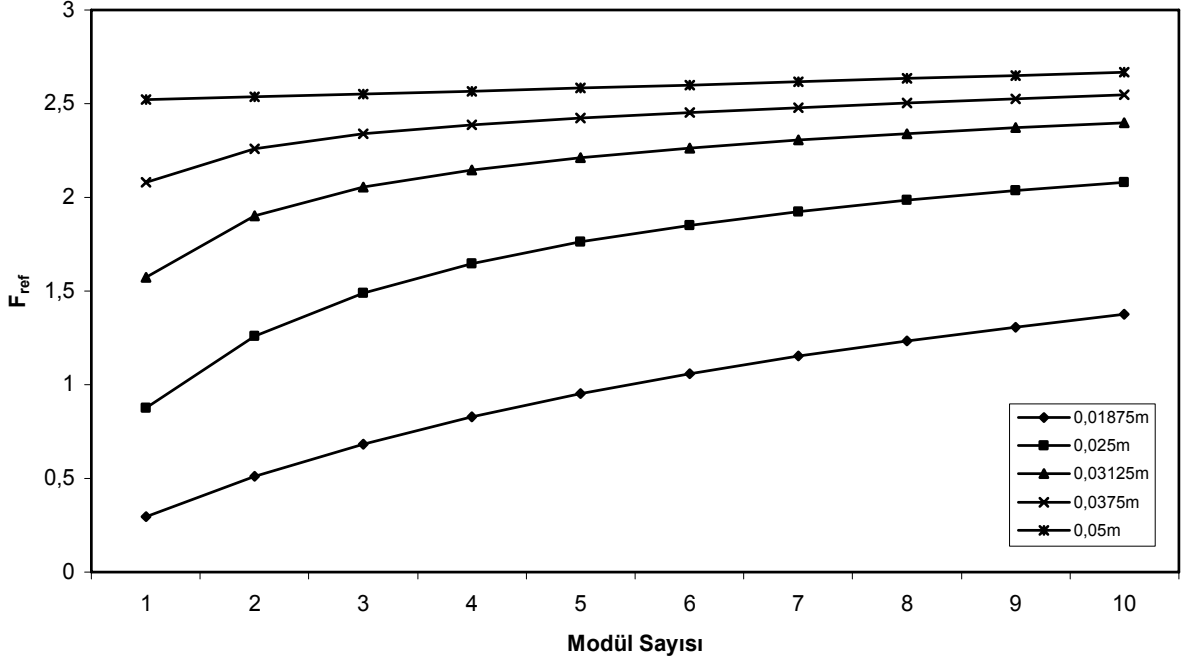
Şekil 7.10'da ise boru çapı ve ısı kapasiteye bağlı olarak referans fonksiyonun değişimi görülmektedir. Bu grafik bize hangi kapasitede hangi boru çapını kullanmamız konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Her bir boru çapı için bir optimum ısı kapasite vardır. Bizim için en uygun olanı optimum ısı kapasite ve optimum modül sayısını baz alan en uygun tasarımı gerçekleştirmektir. Görüldüğü gibi belirli bir optimum güçten daha fazla ısı aktarmak için bir üst çaptaki borunun tercih edilmesi uygun olacaktır. Ayrıca kapasite arttıkça optimum ısı kapasiteden sonra tüm boru çapları için referans fonksiyon sıfıra yaklaşmaktadır.

Şekil 7.11'de ise düşey borulu toprak ısı değiştiricisi için ısı güç ve boru çapına bağlı olarak  $F_{ref}$  fonksiyonunun değişimi görülmektedir.



Şekil 7.11 Boru çapı ve ısı kapasiteye bağlı  $F_{ref}$  fonksiyonunun değişimi

Buradan da görüleceği üzere düşey borulu sistemde  $F_{ref}$  değerleri yatay borulu sisteme göre daha düşüktür. Bunun nedeni sondaj maliyetinden kaynaklanmaktadır. Çünkü hemen hemen aynı boru uzunluğu gerektirmesine rağmen düşey borulu sistemde sondaj maliyeti nedeniyle kurulum maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu da  $F_{ref}$  fonksiyonunda açıkça görülmektedir. Düşey sistemde U boru kullanıldığından kuyu derinliği boru boyunun yarısı kadardır. Yatay istemde ise boru boyu kadar kanal kazılması gerekmektedir. Ancak yine de sondaj maliyeti hafriyat maliyetinin üzerindedir.



Şekil 7.12 Boru çapı ve modül sayısına bağlı  $F_{ref}$  fonksiyonunun değişimi ( $Q=5000$  W)

Şekil 7.12’de ise boru çapı ve modül sayısına bağlı olarak  $F_{ref}$  değişimi görülmektedir. Modül sayısı arttıkça  $F_{ref}$  değeri artmaktadır. Ayrıca boru çapı ile de  $F_{ref}$  değeri artmaktadır. Burada 5 kW’lık bir sistem için hesaplar yapılmıştır. Burada da yatay sistemin daha avantajlı olduğunu görmekteyiz. Sonuç olarak burada asıl karar vermemizdeki etken toprak kaynaklı ısı pompasının kurulacağı yer ve bölge özellikleridir. Eğer yeterli bahçe alanımız yoksa düşey sistemden başka alternatifimiz olmayacaktır. Burada da boru çapı, modül sayısı ve toplam güç en uygun ısı değiştiricisi boyutlarını belirlememizde en önemli değişkenlerimiz olacaktır.

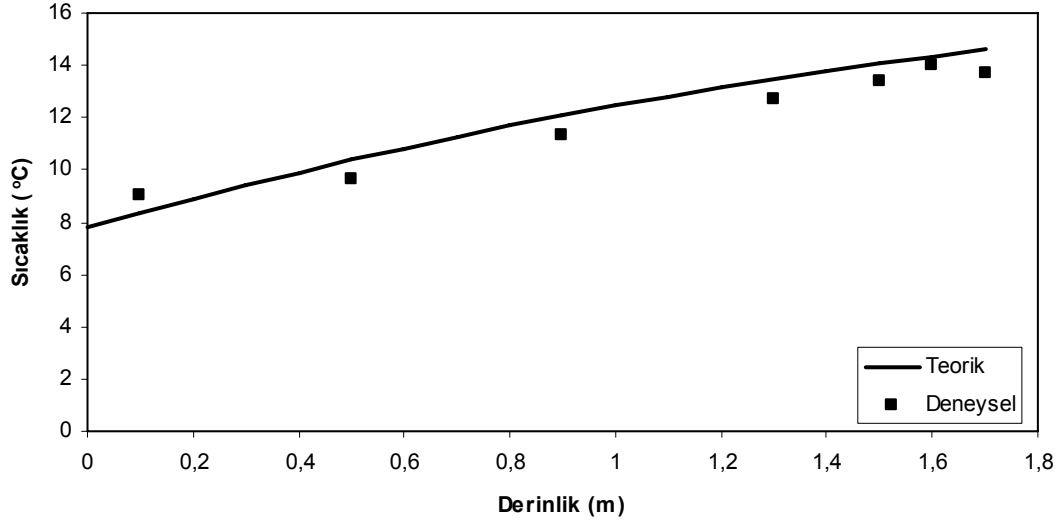
## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Topraktaki sıcaklık dağılımını üç boyutlu ve zamana bağlı olarak hesaplamak üzere çok farklı ve dinamik sınır koşullarını içeren sayısal bir model geliştirilmiştir.
- Taşınım, ışıınım ve yüzey örtüsünün etkisi modelde başarıyla uygulanmış olup yeterli miktarda veri bulunması halinde yağmur veya kar yağışının ve varsa yüzeydeki kar tabakasının etkileri de hesaplara dâhil edilebilir.
- Çizgisel kaynak yöntemi topraktaki sıcaklık dağılımını çok kısa süreler için yeterli hassasiyette hesaplayamaz. Çizgisel kaynaktan  $r$  yarıçapı uzaklığındaki toprak sıcaklığının zamanla değişmediğini kabul ederek kaynaktan itibaren sıcaklık dağılımını simetrik olarak hesaplamaktadır. Fakat toprak sıcaklığı zamana ve derinliğe bağlı olarak değişmektedir ve çizgisel kaynak modelinde öngörüldüğü gibi simetrik değildir. Kaynaktan uzaklaştıkça boru eksenine dik kesitteki sıcaklık dağılımı her yönde aynı değişimi göstermez ve bu sıcaklıklara göre yapılan hesaplamalar gerçek değerden sapma gösterir. Geliştirilen sayısal model sayesinde toprak sıcaklığının derinliğe bağlı değişimi de göz önüne alınarak boru eksenine dik kesitteki sıcaklık dağılımı bulunabilir. Ayrıca yeterli hassasiyette sonuçların elde edilmesi için zaman sınırlaması yoktur ve çok kısa süreler için toprak sıcaklığının değişimi başarılı bir şekilde hesaplanabilir.
- Geliştirilen yazılımda farklı çözüm parametrelerinin sonuçlara etkisi incelenmiş ve toprak sıcaklığının yataydaki değişiminin  $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den daha küçük olduğu ızgara aralığı ve zaman adımının kullanılmasına karar verilmiştir. Daha düşük ızgara aralığı ve zaman adımı kullanılarak daha hassas sonuçların elde edilmesi mümkündür. Ancak ısı çiftlerinin hassasiyetinin  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  olması nedeniyle bu farkı ölçmemiz mümkün olmayacaktır. Çözüm parametreleri olarak  $x$  ve  $y$  yönünde ızgara aralığı  $0.05 \text{ m}$ ,  $z$  yönünde  $1 \text{ m}$  ve zaman adımı  $1800 \text{ s}$  alındığında sonuçların yeterli hassasiyette olduğu sonucuna varılmıştır.
- Andırımında, başlangıç sınır koşulunun hesaplanmasında kullanılan yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı ve toprak sıcaklığındaki dalgalanmanın genliği meteorolojiden alınan İstanbul geneli için on yıllık ortalama değerlerdir. Deney tesisatında ölçülen toprak sıcaklıkları ile hesaplanan toprak sıcaklıkları Şekil 8.1'de görülmektedir. Deneysel ve teorik toprak sıcaklıkları  $\sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$  sapma göstermektedir. Bu sebeple, daha iyi bir yaklaşım yapabilmek için, deney yapılan bölgeye ait yüzeydeki toprak sıcaklığının yıl

boyu değişiminin bilinmesi gerekir.

#### DENEYSEL VE TEORİK TOPRAK SICAKLIKLARI



Şekil 8.1 Deneysel ve teorik toprak sıcaklıkları

- Termoekonomik inceleme sonucunda toprak ısı değiştircilerinin boyutlandırılmasında toprağın ısıl özelliklerinin çok önemli bir parametre olduğu görölmüştür. Toprak ısıl iletkenliği optimum boru boyunu etkileyen en önemli parametredir. Toprak ısıl özelliklerinin ısı değiştircisinin ilk yatırım maliyeti ve referans fonksiyon üzerindeki etkisinin toprak ısıl iletkenliğindeki değişim miktarı kadar olduğu söylenebilir. Toprak ısıl iletkenliğinin iki kat artması durumunda faydalı ısı miktarı da aynı yatırım ve işletme maliyeti için yaklaşık iki kat artmaktadır.
- Aynı güç değeri için yatay borulu toprak ısı değiştircileri düşey borulu toprak ısı değiştircilerine göre daha yüksek  $F_{ref}$  değerine sahiptir. Ancak daha fazla bahçe alanı gerektirir. Yeterli bahçe alanı bulunmaması durumunda tek alternatif düşey U-borulu toprak ısı değiştircileri olacaktır. Düşey U-boru toprak ısı değiştircisinin en büyük dezavantajı sondaj maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Aynı kapasitedeki yatay ve düşey borulu toprak ısı değiştircisinin ilk yatırım maliyetlerinin eşit olması için şu an 80 YTL/m olan birim sondaj maliyetinin 30 YTL/m olması gerekir.
- Gerek deneysel çalışmadan, gerekse konuyla ilgili mevcut çalışmalarla yapılan karşılaştırmadan, geliştirilen teorik modelin yatay borulu toprak ısı değiştircilerinin boyutlandırılmasında ve topraktaki sıcaklık dağılımının bulunmasında güvenilir bir şekilde kullanılabileceği görölmüştür.

Toprak ısı değiştiricilerinin boyutlandırılmasında ise şu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Toprağın ısı iletkenliği, toprağın iğerdiği nem miktarı ve toprak sıcaklığıyla değişmektedir. Bu sebeple yaz ve kış aylarında toprak ısı iletkenliği değişmektedir. Bunun en büyük sebebi kışın yağış nedeniyle toprağın nem iğeriğinin artmasıdır. Ayrıca sistem yazın soğutma amaçlı ęalıřtıęında boru içinde dolaşan akışkan sıcaklığı toprak sıcaklığından yüksektir. Bunun sonucunda boru ve yakın ęevresinden daha uzak bölgelere aynı zamanda kütle geğişi de olmakta ve bu bölgedeki nem iğeriği azalmaktadır. Hesaplamalarda bu değişimin göz önünde bulundurulması ve yaz ve kış şartları için farklı ısı iletkenlik değerinin kullanılması gerekir. Daha doğru bir yaklaşım yapılabilmesi için toprak ısı iletkenliğinin zamana bağlı değişiminin incelenmesi ve hesaplamalara bu değişimin dâhil edilmesi gerekir.
- MATLAB, hız bakımından diğer programlama dillerine göre oldukça yavaş bir programlama dilidir. Ancak matris işlemlerindeki sağladığı kolaylıklar nedeniyle tercih edilmiştir. Andırım süresini etkileyen en önemli parametre ızgara aralığıdır. Matrislerin ęözümü Thomas algoritması kullanılarak yapılmaktadır. ADI yönteminde pek çok matrisin ardı ardına ęözülmesi gerekir. Programlama dilinin de buna katkısı büyüktür. Daha hızlı bir programlama dili kullanılması durumunda (C, C++) ęözüm süresinin daha da kısaltılabileceği açıkęa görölmektedir.
- Üst yüzey etkileri, toprağın ısı iletkenliğine ve ısı yayıcılığına bağlı olarak, toprağın derinliklerine belirli bir hızda iletilmektedir. Yatay borulu toprak ısı değiştiricilerinin toprak yüzeyindeki kısa süreli değişimlerden etkilenmemeleri ve yıl boyunca ęok az değişim gösteren bir kaynak sıcaklığı elde edebilmeleri için en az 1.6 m derinliğe gömülmesi ve aralıksız uzun süreli ęalıřmalarda paralel boruların biri birlerini etkilememeleri için aralarındaki yatay mesafenin 3 m olması gerekir.
- Toprak ısı iletkenliğindeki değişim topraktan ęekebileceęimiz veya toprağa atabileceğimiz ısı miktarını önemli miktarda etkilemektedir. Toprak kaynaklı ısı pompalarında toprağın ısı iletkenliğini ölçen ve buna göre akışkan gidiş sıcaklıklarını ve debisini düzenleyen bir sistem kullanılabilir. Bu sayede hem pompalama giderleri hem de kompresörde harcanan güç kontrol edilerek enerji ekonomisi sağlanabilir.
- %15 nemli bir toprağın ısı iletkenliği kuru toprağın ısı iletkenliğinin yaklaşık üç katıdır. Bu sebeple, özellikle yaz aylarında, toprağın nem iğeriğindeki ve ısı iletkenliğindeki değişime göre boru ve yakın ęevresine su ileten ve bu bölgeyi



nemlendiren bir sistem kullanılarak önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabilir. Ayrıca pik yüklerde ani ısı ihtiyacını karşılamak üzere boru çevresini nemlendirerek toprak kaynaklı ısı pompasının kompresöründe harcanan enerji azaltılabilir.

- Isı değiştircilerinde aktarılan ısı miktarını artırmanın bir diğer yolu yüzey alanı/hacim oranını artırmaktır. Kanatlı veya yüzey alanı/hacim oranı daha büyük kare vb. kesitli borularla ısı geçişi iyileştirilebilir.
- Toprak özellikleri her ne kadar bulunulan bölge ile ilgili olsa da boruların toprağa gömülmesi açılan çukur içerisinde boru yakın çevresinde ısı özellikleri topraktan daha iyi dolgu malzemesi kullanılarak ısı geçişinin daha verimli bir hale gelmesi sağlanabilir. Ayrıca kullanılan dolgu malzemesinin ısı depolama kapasitesinin de yüksek olması yaz aylarında toprağa daha fazla ısı depolanması ve kışın bu ısının ısıtmada kullanılması bakımından önemlidir.

**KAYNAKLAR**

Abu-Hamdeh, N.H., (2003), "Thermal Properties of Soils as Affected by Density and Water Content", *Biosystems Engineering*, 86:97-102

Ahmed, M., (1997), "The Determination of Salat Times", [www.ummah.net/astronomy/saltime/](http://www.ummah.net/astronomy/saltime/)

Akpınar, E., K., (2005), "Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi", *Mühendis ve Makine*, 540:41-48

Austin, W.A., Yavuzturk, C., Spitler, J.D., (2000), "Development of an In-Situ System and Analysis Procedure for Measuring Ground Thermal Properties", *ASHRAE Transactions: Research*, 106:365-379

Başaran, M.E., (2003), "Toprak Kaynaklı Soğutma Makinesi ve Isı Pompasının Termoeconomik Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, 2003, Yıldız Teknik Üniversitesi

Bohm, B., (2000), "On Transient Heat Losses from Buried District Heating Pipes", *Int. Journal of Energy Research*, 24:1311-1334

Cane, R.L.D., Forgas, D.A., (1991), "Modeling of Ground-Source Heat Pump Performance", *ASHRAE Transactions: Symposia*, 909-925

Carlson, S.W., (2000), "GSHP Bore Field Performance Comparison of Standard and Thermally Enhanced Grout", *ASHRAE Transactions: Symposia*, 442-446

Carslaw, H.S., Jeager, J.C., (1950), "Conduction of Heat in Solids", Oxford at the Clarendon Pres, London

Chiasson, A.D., (1999), "Advances in Modeling of Ground Source Heat Pump Systems", MSc Thesis, 1999, Oklahoma State University

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*, 380-393

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

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

Cichota, R., Elias, E.A., Van Lier, Q.J., (2004), "Testing a Finite difference Model for Soil Heat Transfer by Comparing Numerical and Analytical Solutions", *Environmental Modeling & Software*, 19:495-506

Den Braven, K.R., (2000), "Regulations on Grouting for Closed-Loop Ground-Coupled Heat Pumps in United States", *ASHRAE Transactions: Symposia*, 447-452

Diao, N., Li, Q., Fang, Z., (2004), "Heat Transfer in Ground Heat Exchangers with Groundwater Advection", *Int. J. of Thermal Sciences*, 43:1203-1211

- Diz, T., (2001), "Minimum Enerjili Bina Tasarımı (Toprak Enerjisiyle)", Yüksek Lisans Tezi, 2001, Yıldız Teknik Üniversitesi
- Diz, T., Koyun, A., (2001), "Toprak Isı Değişiricilerindeki Isı Geçişi İçin Analitik Model", 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi 2001, Konya
- Dobson, M.K., O'Neal, D.L., Wolfe, M.L., (1993), "A Nondimensional Analysis of Vertical Configuration Ground-Coupled Heat Pump Startup", Transactions of the ASME, 115:220-225
- Doherty, P., S., Al-Huthaili, S., Riffat, S., B., Abodahab, N., (2004), "Ground Source Heat Pump-Description and Preliminary Results of the Eco House System", Applied Thermal Engineering, 24:2627-2641
- Ertekin, C., Yıldız, O., (2000), "Comparison of Some Existing Models for Estimating Global Solar Radiation for Antalya (Turkey)", Energy Conversion & Management, 41:311-330
- Esen, H., İnallı, M., Esen, M., (2005), "Technoeconomic Appraisal of a Ground Source Heat Pump System for a Heating Season in Eastern Turkey", Energy Conversion and Management (Baskıda)
- Flerchinger, G.N., Sauer, T.J., Aiken, R.A., (2003), "Effects of Crop Residue Cover and Architecture on Heat and Water Transfer at the Soil Surface", Geoderma, 116:217-233
- Gauthier, C., Lacroix, M., Bernier, H., (1997), "Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger-Storage Systems for Greenhouses", Solar Energy, 60:333-346
- Gu, Y., O'Neal, D.L., (1995), "An Analytical Solution to Transient Heat Conduction in a Composite Region with a Cylindrical Heat Source", Transactions of the ASME, 117:242-248
- Gül, M.S., Muneer, T., Kambezidis, H.D., (1998), "Models for Obtaining Solar Radiation from Other Meteorological Data", Solar Energy, 64:99-108
- Günerhan, H., Ülgen, K., Hepbaşlı, A., (2001), "Experimental Studies on Geothermal Heat Pumps at the Turkish Universities", 6<sup>th</sup> Turkish-German Energy Symposium 2001, Ege University
- Hastaoğlu, M.A., Negiz, A., Heidemann, R.A., (1995), "Three-Dimensional Transient Heat Transfer from a Buried Pipe – Part III. Comprehensive Model", Chemical Engineering Science, 50:2545-2555
- Healy, P.F., Uğursal, V.I., (1997), "Performance and Economic Feasibility of Ground Source Heat Pumps in Cold Climate", Int. Journal of Energy Research, 21:857-870
- Hepbaşlı, A., Akdemir, O., (2004), "Energy and Exergy Analysis of a Ground Source (Geothermal) Heat Pump System", Energy Conversion and Management, 45:737-753
- Hepbaşlı, A., Akdemir, O., Hancıoğlu, E., (2002), "Experimental Study of a Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System", Energy Conversion & Management,
- Hepbaşlı, A., Hancıoğlu, E., (2001), "Toprak Kaynaklı (Jeotermal) Isı Pompalarının Tasarımı, Testi ve Fizibilitesi", V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi,
- İNallı, M., Esen, H., (2004), "Experimental Thermal Performance Evaluation of a Horizontal Ground-Source Heat Pump System", Applied Thermal Engineering, 24:2219-2232
- Jaluria, Y., (1998), "Design and Optimization of Thermal Systems", The McGraw-Hill Companies Inc., USA

- Johnson, C.R., (2002), "Advanced Methods in Scientific Computing Computer Science 6220", Christopher R. Johnson, University of Utah
- Kang, S., Kim, S., Oh, S., Lee, D., (2000), "Predicting Spatial and Temporal Patterns of Soil Temperature Based on Topography, Surface Cover and Air Temperature", *Forest Ecology and Management*, 136:173-184
- Kangas, M.T., (1996), "Thermohydraulic Analysis of Ground as a Heat Source for Heat Pumps Using Vertical Pipes", *Transactions of the ASME*, 118:300-305
- Kavanaugh, S.P., (2000), "Field Tests for Ground Thermal Properties – Methods and Impact on Ground-Source Heat Pump Design", *ASHRAE Transactions: Symposia*, 851-855
- Kayalı, R., Bozdemir, S., Kıymac, K., (1998), "A Rectangular Solar Pond Model Incorporating Empirical Functions for Air and Soil Temperatures", *Solar Energy*, 63:345-353
- Koyun, A., Diz, T., (2001), "Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Tasarım Değişkenlerinin Optimizasyonu", 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi 2001, Konya
- Lei, T.K., (1993), "Development of a Computational Model for a Ground-Coupled Heat Exchanger", *ASHRAE Transactions: Research*, 99:149-159
- Ling, F., Zhang, T., (2004), "A Numerical Model for Surface Energy Balance and Thermal Regime of the Active Layer and Permafrost Containing Unfrozen Water", *Cold Regions Science and Technology*, 38:1-15
- Mei, V.C., (1991), "Heat Transfer of Buried Pipe for Heat Pump Application", *Journal of Solar Energy Engineering*, 113:51-55
- Metz, P.D., (1983), "A Simple Computer Program to Model Three-Dimensional Underground Heat Flow with Realistic Boundary Conditions", *Transactions of the ASME*, 105:42-49
- Mihalakakou, G., (2002), "On Estimating Soil Surface Temperature Profiles", *Energy and Buildings*, 34:251-259
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J.O., Asimakopoulos, D.N., (1997), "On the Application of the Energy Balance Equation to Predict Ground Temperature Profiles", *Solar Energy*, 60:181-190
- Morofsky, E., (1992), "Development of Algorithms for Ground Source Heat Pump Heat Exchanger Length Prediction and Energy Analysis", Caneta Research Inc., Ontario
- 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
- 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
- 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
- Nishioka, J., (1993), "Heat Transfer Characteristic of an Earth-Probe Model for a Ground-Source Heat Pump (Experiments on Forced-Convection-Boiling Heat Transfer in a Vertical Double Tube: The Case of Small Flow Rates)", *Heat Transfer-Japanese Research*, 22:661-671

- Özgener, Ö., Hepbaşlı, A., (2005), “A Parametrical Study on the Energetic and Exergetic Assesment of a Solar-Assisted Vertical Ground-Source Heat Pump System Used for Heating a Greenhouse”, *Building and Environment (Baskıda)*
- Özgener, Ö., Hepbaşlı, A., (2005), “Exergoeconomic Analysis of a Solar-Assisted Ground-Source Heat Pump Greenhouse Heating: System”, *Applied Thermal Engineering*, 25:1459-1471
- Özgener, Ö., Hepbaşlı, A., (2005), “Experimental Performance Analysis of a Solar-Assisted Ground-Source Heat Pump Greenhouse Heating: System”, *Energy and Buildings*, 37:101-110
- Özgener, Ö., Hepbaşlı, A., (2005), “Performance Analysis of a Solar-Assisted Ground-Source Heat Pump System for Greenhouse Heating: an Experimental Study”, *Building and Environment*, 40:1040-1050
- Özışık, M.N., (1980), “Heat Conduction”, A Wiley Interscience Publication
- Piechowski, M., (1996), “A Ground Coupled Heat Pump System with Energy Storage”, PhD Thesis, 1996, The University of Melbourne
- Piechowsky, M., (1999), “Heat and Mass Transfer of a Ground Heat Exchanger: Theoretical Development”, *Int. Journal of Energy Research*, 23:571-588
- Plauborg, F., (2002), “Simple Model for 10 cm Soil Temperature in Different Soils with Short Grass”, *European Journal of Agronomy*, 17:173-179
- Popiel, C.O., Wojtkowiak, J., Biernacka, B., (2001), “Measurements of Temperature Distribution in Ground”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25:301-309
- Rabin, Y., Korin, E., (1996), “Thermal Analysis of a Helical Heat Exchanger for Ground Thermal Energy Storage in Arid Zones”, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 39:1051-1065
- Sachs, H.M., Dinse, D.R., (2000), “Geology and Ground Heat Exchanger: What Engineers Need to Know”, *ASHRAE Transactions: Symposia*, 421-433
- Shonder, J.A., (2000), “Field Test of a New Method for Determining Soil Formation Thermal Conductivity and Borehole Resistance”, *ASHRAE Transactions: Symposia*, 843-850
- Shonder, J.A., Baxter, V., Thorton, J., Hughes, P., (1999), “A New Comparison of Vertical Ground Heat Exchanger Design Methods for Residential Applications”, *ASHRAE Transactions: Symposia*, 1179-1188
- Shonder, J.A., Baxter, V.D., Hughes, P.J., Thorton, J.W., (2000), “A Comparison of Vertical Ground Heat Exchanger Design Software for Commercial Applications”, *ASHRAE Transactions: Symposia*, 831-842
- Spilker, E.H., (1998), “Ground-Coupled Heat Pump Loop Design Using Thermal Conductivity Testing and the Effect of Different Backfill Materials on Vertical Borehole Length”, *ASHRAE Transactions: Symposia*, 775-779
- Şahin, B., Kodal, A., (1999), “Finite Time Thermoeconomic Optimization for Endoreversible Refrigerators and Heat Pumps”, *Energy Conversion & Management*, 40:951-960
- Şaylan, L., Şen, O., Toros, H., Arısoy, A., (2002), “Solar Energy Potential for Heating and Cooling Systems in Big Cities of Turkey”, *Energy Conversion & Management*, 43:1829-1837

- Thornton, P.E., Running, S.W., (1999), "An Improved Algorithm for Estimating Incident Daily Solar Radiation from Measurements of Temperature, Humidity and Precipitation" , *Agricultural and Forest Meteorology*, 93:211-228
- Timlin, D.J., Pachevsky, Y., Acock, B.A., Simunek, J., Flerchinger, G., Whisler, F., (2002), "Error Analysis of Soil Temperature Simulations Using Measured and Estimated Hourly Weather Data with 2DSOIL", *Agricultural Systems*, 72:215-239
- Toğrul, I.T., Onat, E., (1999), "A Study for Estimating Solar Radiation in Elazığ Using Geographical and Meteorological Data", *Energy Conversion & Management*, 40:1577-1584
- Tünay, K.B., (2002), "Toprak Sıcaklığının Zamana ve Derinliğe Bağlı Değişiminin Hesaplanması", *Lisans Bitirme Tezi*, 2002, Yıldız Teknik Üniversitesi
- Von Rosenberg, D.U., (1969), "Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations", Publishing Division Gerald L. Farrar & Associates Inc., Tulsa
- Wang, J., Bras, R.L., (1999), "Ground Heat Flux Estimated from Surface Soil Temperature", *Journal of Hydrology*, 216:214-226
- Wong, L.T., Chow, W.K., (2001), "Solar Radiation Model", *Applied Energy*, 69:191-224
- Yang, K., Huang, G.W., Tamai, N., (2001), "A Hybrid Model for Estimating Global Solar Radiation", *Solar Energy*, 70:13-22
- Yang, K., Koike, T., (2002), "Estimating Surface Solar Radiation from Upper-Air Humidity", *Solar Energy*, 72:177-186
- Yavuztürk, C., (1999), "Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems", PhD Thesis, 1999, Oklahoma State University
- Yavuztürk, C., Spitler, J.D., (1999), "A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers", *ASHRAE Transactions: Research*, 105:475-485
- Yavuztürk, C., Spitler, J.D., Rees, S.J., (1999), "A Transient Two-Dimensional Finite Volume Model for the Simulation of Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers", *ASHRAE Transactions: Research*, 105:465-474
- Zhang, Q., (2000), "Measurement of Thermal Conductivity for Three Borehole Fill Materials Used for GSHP", *ASHRAE Transactions: Symposia*, 434-441

**EKLER**

Ek 1 Isıl çift kalibrasyon eğri denklemleri

Ek 1 Isıl çift kalibrasyon eğri denklemleri ( $y=ax+b$ )

ISIL ÇİFT	A	B
1	1.003469	-2.08288
2	1.001017	-2.34399
3	1.003469	-2.08288
4	1.006174	-2.35813
5	0.999856	-2.72525
6	1.020551	-2.78994
7	0.999856	-2.72525
8	0.999009	-2.33848
9	0.973743	-2.00933
10	1.003469	-2.08288
11	1.017621	-2.28950
12	0.991929	-2.21908
13	1.002028	-2.24676
14	0.986906	-2.20531
15	1.017621	-2.28950
16	1.012335	-2.27501
17	0.997003	-2.23298
18	1.013894	-2.93923
19	1.005657	-1.60092
20	0.998414	-2.88672
21	1.010062	-2.36878
22	1.004860	-2.35452
23	1.003689	-2.73723
24	0.987047	-2.04225
25	1.034992	-1.74657
26	1.075920	-2.48239
27	1.063193	-1.80506
28	1.061265	-2.70314
29	1.032736	-1.74189
30	1.034992	-1.74657
31	1.026821	-1.98120
32	1.085522	-2.50811
1A	1.047319	-1.79464
2A	1.055197	-2.78117
3A	1.066039	-2.52500
4A	1.054470	-2.49435
5A	1.014773	-1.72955
6A	1.060251	-2.50967
7A	1.059124	-3.48107
8A	1.064842	-3.50149
Giriş	0.924270	1.47105
Çıkış	0.924795	1.75470



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	15.02.1975	
Doğum yeri	Koyulhisar	
Lise	1986-1992	Nevzat Ayaz Lisesi
Lisans	1992-1996	Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1996-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı
Doktora	1999-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı kurum(lar)**

1998-Devam ediyor YTÜ Makine Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi