

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE
YENİ BİR ISIL TEPKİ YÖNTEMİ VE PERFORMANSIN PARAMETRİK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat AYDIN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

EKİM 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE
YENİ BİR ISIL TEPKİ YÖNTEMİ VE PERFORMANSIN PARAMETRİK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Murat AYDIN
(301062009)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN
Eş Danışman: Prof. Dr. Herhan UYGUNBAŞI
Programı : Herhangi Program**

EKİM 2015

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Isınma insanlığın en temel ihtiyaçlarından birisidir. İlk çağlarda ateşle ısınmadan bugünkü akıllı teknolojilere kadar çok farklı ısınma yöntemleri olmuştur. Isınmayı sağlayacak kaynakların yerli ve ekonomik olması ülke açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle ısıtma, ülkenin önemli ve üzerinde çalışan sayısının yüksek olduğu bir alandır. Ben de bu çalışmaya başlamadan önce ısıtma sektöründe uzun yıllar bulundum ve yeni, alternatif ısıtma teknolojileri üzerine yaptığım araştırmalar sonucunda en yerli ve ekonomik sistemlerden birisinin toprak destekli ısıtma sistemleri olduğunu gördüm. Bu konu ile ilgili hem akademik hem de ticari olarak ilgilenmeye başladım. İncelemelerim sırasında ne yazık ki yapılan çoğu uygulamanın ciddi bir bilgiye, hesaba dayanmadığı ve ülkemizde bu alanda çok az çalışma yapıldığı izlenimini elde ettim. Akademik olarak ön araştırmalarım sonucu bu konu ile ilgili çalışılabilecek geniş bir alan olduğunu görerek değerli tez danışmanım *Prof.Dr. Altuğ Şişman* ile bir plan dâhilinde çalışmaya başladık.

Çalışmaya başladıktan sonra imalat sektörünün önemli isimlerinden ve bu sistemi kendi evinde uzun yıllardır kullanan *Şükrü Dinçer* Bey'in çok değerli katkılarıyla çalışmamız sponsor firmalara ve onların desteği ile geniş bir boyuta kavuştu. Bunlardan en başta laboratuvarın kurulması ve projeyi kendisine anlattığımızda ısı pompasının yerli üretimi ile beraber bu projeye tereddütsüz destek veren BAYMAK eski genel müdürü *Dr.Murat Akdoğan*'a ve teknik konularda en başından beri birlikte çalıştığımız *Şükrü Dinçer* ve Ar-Ge müdendisi *Can Erdoğan*'a, proje içerisinde kullandığımız tüm boruları büyük bir incelikle projemize destek amaçlı bedelsiz sağlayan REHAU firmasına, malzeme ve işgücü desteği ile her zaman yanımızda olan DİNÇER Makine, Toprak Isı Sistemleri firmalarına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tezin akademik olarak planlama aşamasından bitişine kadar her türlü detayla ilgilenen, her konuda emeği olan ve çıkan problemleri beraber çözdüğümüz başta tez danışmanım *Prof.Dr.Altuğ Şişman*'a, çalışmaya sonradan eş danışman olarak giren değerli hocamız *Prof.Dr.Seyhan Uygur Onbaşıoğlu*'na ve ilk tez önerisinden en son düzeltmelere kadar her türlü yardımlarını, bilgilerini eksik etmeyen ve ciddi bir şekilde tez ile ilgilenen değerli tez izleme jürisi üyeleri *Prof.Dr. Filiz Baytaş* ve *Prof.Dr. Mustafa Onur*'a ve tezi okuyarak çok değerli önerilerde bulunan yarım asıra yaklaşan tecrübesi ile tesisat sektörünün önemli isimlerinden biri olan *İbrahim Köroğlu* Bey'e ve yaptıkları çalışmalarla bu teze destek olan laboratuvar çalışma arkadaşlarım *Ahmet Gültekin* ve *Babak Dehghan*'a teşekkür ederim.

Ekim 2015

Murat Aydın
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Isı Pompasının Çalışma Prensibi	2
1.2 Etkinlik Katsayısı (COP).....	3
1.3 Isı Pompası Tipleri	5
1.4 Toprağın Isı Kaynakları.....	5
1.5 Isı Deposu Olarak Toprağı Kullanmak	7
1.6 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantajları.....	9
1.6.1 Enerji dönüşümü açısından	9
1.6.2 Son kullanıcıya maliyeti açısından	9
1.6.3 Çevre açısından	11
1.7 İklimin Etkisi.....	12
1.8 Toprak Isı Değiştiricileri ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	12
1.8.1 Sabit ısı akılı ısıl tepki testi (ITT) ile ilgili çalışmalar	17
1.8.2 Diğer kuyu modelleme çalışmaları	18
1.8.3 Düşey toprak ısı değiştiricileri üzerine yapılan çalışmalar	19
1.8.4 Yatay toprak ısı değiştiricileri üzerine yapılan çalışmalar	21
1.9 Türkiye'deki Durum.....	23
1.10 Toprak Isı Değiştiricilerinin Optimizasyonu.....	25
1.11 Tezin Amacı	26
1.12 Tez Çalışmasının Özgünlüğü	27
1.13 Tez Çalışmasının Şematik Olarak Gösterilmesi.....	28
2. DÜŞEY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ İÇİN DENEYSEL OLARAK DOĞRULANAN ANALİTİK BİR MODEL VE UZUN SÜRELİ PERFORMANS ÖNGÖRÜSÜ	31
2.1 Geleneksel Isıl Tepki Testindeki (ITT) Eksikler ve Önerilen Metot	31
2.2 Tez Çerçevesinde Gerçekleştirilen Sabit Sıcaklıklı Isıl Tepki Testi İçin Analitik Modelin Kurulması	33
2.3 Birim Isı Transferi İçin Temsili Bir İfadenin Bulunması.....	38
2.4 Isıl Tepki Test (ITT) Sistemi.....	41
2.5 Deneysel Sonuçlar	43
2.5.1 Test sıcaklığının etkisi	45
2.5.2 Toprak yapısının sonuçlara etkisi	46
2.6 Modelin Doğrulanması.....	47

2.6.1 Hata analizi.....	50
2.7 Uzun Zamanlı Öngörüler.....	51
2.8 Optimum Test Süresinin Belirlenmesi	53
3. DÜŞEY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE PERFORMANS	
GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI	55
3.1 Boru Çapının Etkisi (BOÇET)	55
3.2 Borular Arası Mesafenin Etkisi (BAMET)	64
3.3 Çoklu U Borusu İncelemesi (ÇOKLU U)	69
3.3.1 Deneysel çalışma.....	69
3.3.2 Deneysel sonuçlar	71
3.3.3 Bir kuyuda 4U ve 5U-boru durumlarının sayısal analizi	76
3.3.4 Maliyet analizi.....	79
3.3.5 Çoklu U incelemesinde elde edilen sonuçlar	81
3.4 Kuyu Derinliğinin Performansa Etkisi (KUDET).....	82
3.4.1 Deneysel inceleme.....	82
3.4.2 Kuyu derinliğinin etkisi incelemesinden elde edilen sonuçlar	86
3.5 Kuyular Arası Mesafenin Etkisi (KAMET)	86
3.5.1 Çoklu kuyu modelleme	87
3.5.2 Modelleme sonuçları	88
3.5.3 Kuyular arası mesafenin etkisi incelemesinden elde edilen sonuçlar	94
3.6 Akış Hızının Birim Isı Transferi Değerine Etkisi (AHET)	95
3.7 Kuyudaki Isı Transferini Arttırmaya Yönelik Çalışmaların Sonuçları	98
4. YATAY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE PERFORMANS	
GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI	99
4.1 Deneysel Ölçümler	100
4.2 Test Sonuçları.....	102
4.3 Birim Değerler Üzerinden Bir Karşılaştırma	105
4.4 Helisel Isı Değiştirici İncelemesi.....	107
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	119
EKLER.....	127
ÖZGEÇMİŞ.....	153
.....	153

KISALTMALAR

AHET	: Akış Hızının Etkisi
BAMET	: Borular Arası Mesafenin Etkisi
BOÇET	: Boru Çapının Etkisi
COP	: Coefficient Of Performance (Etkinlik Katsayısı)
GSHP	: Ground Source Heat Pump
HDPE	: High Density Polyetilen (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
HTR	: Heat Transfer Rate
ITES	: Isıl Tepki Test Sistemi
ITT	: Isıl Tepki Testi
KAMET	: Kuyular Arası Mesafenin Etkisi
KK	: Kritik Kuyu
KUDET	: Kuyu Derinliğinin Etkisi
MAE	: Mean Absolute Error
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error
PE	: Polietilen
PE-Xa	: Çapraz bağlarla üretilmiş Polietilen
PID	: Proportional Integral Derivative
PK	: Performans Kaybı
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
TASO	: Toprak Altı Sıcaklık Ölçümü
TID	: Toprak Isı Değiştiricisi
TK	: Tek Kuyu
TOKIP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası

SEMBOLLER

A	Kesit	m^2
ba	Borular arası açıklık	m
c	Eğim	$^{\circ}C/m$
c_p	Özgül Isı Kapasitesi	$J/(kgK)$
d	Kuyular arası aralık	m
D	Çap	mm
f	Sürtünme faktörü	-
g	Yerçekimi ivmesi	m/s^2
h	Konveksiyon katsayısı	$W/(m^2K)$
h_k	Pompa yükü	m
H	Kuyu derinliği	m
J	Isı akısı	W/m^2
k	Isıl İletkenlik	W/mK
K	Basınç Kayıpları	m
l	Boru uzunluğu	m
L	Kuyu-laboratuvar arası mesafe	m
m	Maliyet	TL/W
\dot{m}	Kütleli Debi	kg/s
N_U	U-borusu sayısı	Adet
N	Kuyu sayısı	Adet
\dot{V}	Hacimsel Debi	m^3/s
\emptyset	Çap Sembolü	-
\dot{q}	Kuyudaki toplam ısı yükü	W
\dot{q}'	Birim uzunluktaki ısı yükü	W/m
\tilde{q}'	Boyutsuz birim uz. ısı akısı	-
Pr	Prandtl Sayısı	-
r	Yarı çap	m
\tilde{r}	Boyutsuz çap	-
R	Isıl Direnç	$K m/W$
Re	Reynolds Sayısı	-
t	Zaman	s
\tilde{t}	Boyutsuz zaman	-
T	Sıcaklık	$^{\circ}C$
\bar{T}	Ortalama Sıcaklık	$^{\circ}C$
v	Akış hızı	m/s
\dot{W}	Güç	W
x_c	U borusu merkezden merkeze aralık	m
z	Yükseklik	m

GreK Harfleri

α	Isıl yayılım katsayısı	m^2/s
----------	------------------------	---------

ε	Pürüzlülük	-
η	Verim	-
θ	Boyutsuz sıcaklık	-
σ	Standart Sapma	-
μ	Dinamik Viskozite	Pa.s
δ	Isıl etkileşim katsayısı	m
ρ	Yoğunluk	kg/m ³

Alt Simge

a	akışkan
b	boru
b,d	boru dışı
b,i	boru içi
c	computational, sayısal
ça	çözüm alanı
d	dönen
den	deneysel
dl	dolgu
eff	efektif (etkin) değer
eş	eşdeğer
g	giden
ı	ısıtma
j	jeotermal
k	kuyu
KK	kritik kuyu
kyp	kayıp
pe	polietilen boru
Q	ısı akısı
r	gerçek değer
s	soğutma
t	toprak
TK	tek kuyu
top	toplam
y	yalıtım
z	toprak derinliği
∞	bozulmamış, doğal, uzak sınır

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Son kullanıcıya yönelik birim ısıtma maliyetleri..	10
Çizelge 2.1 : Debimetre ve sıcaklık sensörlerinin özellikleri.	41
Çizelge 2.2 : İncelemede kullanılan kuyuların özellikleri ve test koşulları.	43
Çizelge 2.3 : Kuyu 1 de farklı sıcaklıklardaki test koşulları ve bulunan ısı iletkenlikler.	45
Çizelge 2.4 : Çalışma alanlarının özellikleri.	47
Çizelge 2.5 : Kuyu 2'deki farklı test süreleri için ısı iletkenlikler ve farkları.	53
Çizelge 3.1 : BOÇET test koşulları.	59
Çizelge 3.2 : BOÇET test sonuçları.	60
Çizelge 3.3 : <i>Comsol</i> modelinde kullanılan parametreler.	61
Çizelge 3.4 : Deney sonuçlarının <i>Comsol</i> sonuçlarıyla karşılaştırması.	62
Çizelge 3.5 : Farklı kuyu ve boru çapları için modelleme sonuçları.	63
Çizelge 3.6 : Kuyu 1 ve Kuyu 6 için test koşulları.	66
Çizelge 3.7 : BAMET test sonuçları.	67
Çizelge 3.8 : <i>Comsol</i> modelinin doğrulanması için deney ve <i>Comsol</i> modelleme sonuçlarının karşılaştırması.	67
Çizelge 3.9 : Farklı kuyu çaplarında boru aralığı değişiminin performansa etkisi.	67
Çizelge 3.10 : İncelemede kullanılan kuyunun (Kuyu 6) özellikleri.	70
Çizelge 3.11 : Farklı U-borusu uygulamalarında deneysel koşullar ve 12-70 saat arası deney sonuçları.	72
Çizelge 3.12 : <i>Comsol</i> modelinde kullanılan toprağın ısı özellikleri. Isı iletkenlik değeri denklem (2.17)'nin deneysel sonuçlarla denkleştirilmesi ile elde edilmiştir.	75
Çizelge 3.13 : Geometrik parametreler, malzeme özellikleri ve çalışma koşulları.	77
Çizelge 3.14 : Sayısal hesaplamalarda kullanılan sıcaklık değerleri ve birim ısı transferi değerleri sonuçları. 1U, 2U ve 3U deneyleri için deneysel sonuçlara dayalı ortalama değerler, 4U ve 5U için denklem (3.6) ile tahmin edilen değerler.	78
Çizelge 3.15 : Farklı U-borusu sayıları için 100m'lik kuyunun hesaplanan maliyeti	80
Çizelge 3.16 : Farklı sayılarda U-boruları için sayısal sonuçlar. Bağlı sonuçlar 16 haftanın ortalama değerleri düşünülerek hesaplanmıştır.	81
Çizelge 3.17 : Kuyu derinliği incelemesi için parametreler ve elde edilen sonuçlar.	84
Çizelge 3.18 : 100m ve 50m'lik kuyular için test sonuçları ve hesaplanan değerler.	86
Çizelge 3.19 : Farklı kuyu sayıları ve çalışma süreleri için ısı etkileşim katsayısı ve MAPE değerleri.	93
Çizelge 3.20 : Çalışma parametreleri ve farklı akış hızları için elde edilen sonuçlar	96
Çizelge 4.1 : Yatay uygulamaların özellikleri.	102
Çizelge 4.2 : Yatay tip ısı değiştiricileri test sonuçları.	104
Çizelge 4.3 : Birim boru uzunluğu açısından ve normalize değerler üzerinden karşılaştırma.	106
Çizelge 4.4 : Birim alanda elde edilen ısı yükü açısından karşılaştırma.	106

Çizelge 4.5 : 100m uzunluktaki sarmal ve slinky ısı değiştiricilerinin uygulama maliyetleri.	107
Çizelge 4.6 : Birim yatırım maliyeti açısından karşılaştırma.	107
Çizelge 4.7 : Helisel ısı değiştirici zellikleri.	108
Çizelge 4.8 : Test suresince toprak altı koşulları.	108
Çizelge 4.9 : Çizelge 4.7’de verilen özelliklerdeki helisel ısı değiştiricisinin yatay ve düşey uygulama maliyetleri.	109
Çizelge 4.10 : Helis test sonuçları.	110
Çizelge A.1 : Sensörlerde okunan değerler ve sapmalar.	130
Çizelge A.2 : Her bir sensör için farklı sıcaklıklardan elde edilen sonuçlar.	130
Çizelge A.3 : Kullanılan sensörlerin kalibrasyon denklemler.	132
Çizelge A.4 : Sensör yerleştirilecek derinlikler.	133
Çizelge B.1 : Açılan kuyuların özellikleri ve kullanıldığı incelemeler.	139
Çizelge B.2 : <i>MixIII</i> içeriği ve içerik oranlar.	146
Çizelge B.3 : Silis kumu zellikleri.	146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Isı pompası çalışma prensibi (Url-1).	3
Şekil 1.2 : Isıtma ve soğutma modunda çalışan toprak kaynaklı ısı pompalarında ısı transfer mekanizmaları.	4
Şekil 1.3 : Toprak sıcaklığının <i>İstanbul/Maslak</i> için farklı aylarda derinlikle değişimi.	6
Şekil 1.4 : Düşey toprak altı ısı değiştiricisinin ısı pompasında kullanımı.	7
Şekil 1.5 : a) Kapalı düşey toprak, b) kapalı yatay toprak, c) hava ve d) açık su kaynaklı ısı pompalarının görsel temsilleri (Url-3).	8
Şekil 1.6 : a) 1. yol: Fosil yakıtların doğrudan yakılması ile ısı enerjisi üretilmesi, b) 2. yol: Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi elde edilerek ısı pompası yardımıyla ısı enerjisi üretilmesi.	10
Şekil 1.7 : Farklı ısınma sistemlerinde CO ₂ salınım oranları (Url-5).	11
Şekil 1.8 : Örnek bir ısıl tepki testi ile elde edilen ort. akışkan sıcaklığının logaritmik zamandaki değişimi (c değeri = 3.57).	15
Şekil 1.9 : Eşdeğer boru yaklaşımı.	16
Şekil 1.10 : Sabit ısı akılı ısıl tepki testinin temsili şekli.	17
Şekil 1.11 : Yatay / sığ toprak ısı değiştirici tipleri.	21
Şekil 1.12 : <i>Türkiye'nin</i> 2012 yılı toplam enerji tüketimi dağılımı (Url-6).	23
Şekil 1.13 : Toprak kaynaklı ısı pompası piyasasının gelişimini engelleyen problemler.	25
Şekil 1.14 : Tez çalışmasının grafiksel özeti.	29
Şekil 2.1 : Bir kuyunun perspektif görüntüsü ve kesiti.	34
Şekil 2.2 : Boyutsuz zamana göre boyutsuz birim ısı transferinin değişimi.	38
Şekil 2.3 : $\ln(\tilde{q}') - \ln(\tilde{r})$ grafiği, Şekil 2.2'nin logaritmik koordinatlarda gösterimi.	39
Şekil 2.4 : Denklem (2.13) ve (2.17)'in sonuçlarının karşılaştırılması.	40
Şekil 2.5 : Çakıştırma ve uzun süreli performans öngörüsü işlemlerinin gösterimi. ...	40
Şekil 2.6 : Sabit sıcaklıkta test yapabilen ısıl tepki test sistemi tesisat şeması.	42
Şekil 2.7 : Isıl tepki test sistemi görüntüsü.	42
Şekil 2.8 : Kuyu 1'de test süresince gidiş, dönüş ve ortalama sıcaklıkların değişimi.	44
Şekil 2.9 : Kuyu 1'in birim ısı transfer değerinin test süresince değişimi.	44
Şekil 2.10 : Kuyu 1 için farklı sıcaklıklardaki deneysel veriler ve Denklem (2.17) kullanarak elde edilen denkleştirilmiş eğriler.	45
Şekil 2.11: Hacimsel ısı kapasitesinin ısıl iletkenliğe etkisi.	46
Şekil 2.12 : Toprak ısıl iletkenliğinin ortalama birim ısı yüküne etkisi.	47
Şekil 2.13 : <i>Comsol</i> modeli ve ağ yapısı.	48
Şekil 2.14 : Kuyu 1 için deneysel veriler veriler ve <i>Comsol</i> modelinin sonuçları, (k_t :2.27 W/mK).	48
Şekil 2.15 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 1'e ait deneysel veriler ile <i>Comsol</i> modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.27 W/mK, $r_{eş}$:25.8mm).	49

Şekil 2.16 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 4'e ait deneysel veriler ile <i>Comsol</i> modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.47 W/mK, $r_{eş}$:25.9mm).....	49
Şekil 2.17 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 5'e ait deneysel veriler ile <i>Comsol</i> modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.39 W/mK, $r_{eş}$:27.7mm).....	50
Şekil 2.18 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 2'ye ait deneysel veriler ile <i>Comsol</i> modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.19W/mK, $r_{eş}$:25.7mm).....	50
Şekil 2.19 : Kuyu 1 için 40 °C çalışma sıcaklığında 300 saatlik performans öngörüsü.	52
Şekil 2.20 : Kuyu 1 için 40 °C çalışma sıcaklığında 2400 saatlik performans öngörüsü.	52
Şekil 3.1 : Boru çapı incelemesinde kullanılan kuyuların özellikleri.	56
Şekil 3.2 : Kuyu 1 testi debinin test süresince değişimi.	57
Şekil 3.3 : Kuyu 5 testi giden ve dönen su sıcaklıklarının test süresince değişimi. ..	57
Şekil 3.4 : Kuyu 5'te test süresince debinin değişimi.	58
Şekil 3.5 : Kuyu ve ısı test sistemi arasındaki bağlantı hattındaki borunun kesiti. ..	58
Şekil 3.6 : 2 Boyutlu <i>Comsol</i> modeli için çözüm alanları ve özellikleri.	60
Şekil 3.7 : Kuyu 1 testi süresince birim ısı yükünün zamanla değişimi ve örtüştürme sonucu <i>Comsol</i> ile elde edilen eğri.	61
Şekil 3.8 : Kuyu 5 testi süresince birim ısı yükünün değişimi ve örtüştürme sonucu <i>Comsol</i> ile elde edilen eğri.	62
Şekil 3.9 : Farklı kuyu ve boru çapları için modelleme sonuçları.	63
Şekil 3.10 : BAMET incelemesinde kullanılan kuyuların özellikleri.....	64
Şekil 3.11 : Kuyu 6 testi sırasında a) gidiş ve dönüş sıcaklıklarının ve b)debinin zamanla değişimi.	65
Şekil 3.12 : Kuyu 6'nın birim ısı yükünün zamanla değişimine ait deneysel ölçümler ve aynı koşullarda <i>Comsol</i> 'la elde edilen eğri.....	66
Şekil 3.13 : 200 mm (Kuyu 6) ve 176 mm lik (Kuyu 1) kuyularda borular arası açıklığın birim ısı yüküne etkisi.	68
Şekil 3.14 : Kuyu kesiti boru aralığı ve boru çapı.	68
Şekil 3.15 : 3U borusu kullanılmış kuyu kesiti.....	69
Şekil 3.16 : a) Delme başlığı, b) Kelepçe, c) Kelepçe her 1m'de kullanıldı, d) TID kuyu içerisinde.	71
Şekil 3.17 : Kanal kapatılmadan önceki kuyu ve laboratuvar arasındaki boru hatları.	74
Şekil 3.18 : 1U, 2U ve 3U-boru konfigürasyonları için deneysel sonuçlar ve <i>Comsol</i> sonuçları (sürekli çizgiler).....	74
Şekil 3.19 : 1U, 2U ve 3U borulu bir kuyunun birim ısı transfer değerinin uzun zamanlı öngörüsü.	75
Şekil 3.20 : 4U-borusu ve 5U-borusu yerleştirilmiş kuyu kesitleri.	77
Şekil 3.21 : Farklı U-borusu sayıları için sayısal birim ısı geçişinin zamana bağlı değişimine ilişkin model sonuçları.....	78
Şekil 3.22 : 70 saat sürekli çalışma durumu için birim ısı transferi değerinin U borusu sayısı ile değişimine ilişkin model sonuçları.....	79

Şekil 3.23 : U-borusu sayısına bağlı olarak birim yatırım maliyeti ile 16 hafta sürekli çalışma durumunda ortalama birim ısı transferindeki bağlı değişimler..	80
Şekil 3.24 : 100 m'lik kuyu için dönüş sıcaklığı ve ortalama akışkan sıcaklığının sonuçları.	83
Şekil 3.25 : 50m'lik kuyu için dönüş sıcaklığı ve ortalama akışkan sıcaklığının sonuçları.	83
Şekil 3.26 : Kuyu testlerinden elde edilen birim ısı transferi sonuçları (Kuyu 1 ve 4).	84
Şekil 3.27 : Toprak altı sıcaklık ölçümü 2013 yılı sonuçları.	85
Şekil 3.28 : Çeşitli kuyu dizilimleri, (çeperi kırmızı olanlar kritik kuyular).	87
Şekil 3.29 : Kuyular arasında 3 m aralık bulunması durumunda farklı kuyu dizilimleri için 2400 saat sonunda ortaya çıkan sıcaklık dağılımları.	88
Şekil 3.30 : 1800 saat ve 2400 saat kesintisiz çalışma koşulları için kuyu aralığına bağlı olarak KK'lardaki performans kaybının değişimi.	89
Şekil 3.31 : KK'nun ısı iletkenlik ile performans kaybının değişimi a) 3 m aralıklı 1800 saat çalışma durumu, b) 6 m aralıklı 2400 saat çalışma durumu.	90
Şekil 3.32 : Toplam birim ısı yükünün kuyu aralığı ve çalışma süresi ile değişimi a)1800 sa, b) 2400 sa.	92
Şekil 3.33 : Isıl etkileşim katsayısı δ 'nın N sayısı ile değişimi.	93
Şekil 3.34 : Kuyu aralığının birim kuyudaki ısı yüküne etkisi a)1800 sa, b) 2400 sa.	94
Şekil 3.35 : Farklı akış hızlarında elde edilmiş deney sonuçları.	96
Şekil 3.36 : Kuyu kesit görüntüsü.	97
Şekil 4.1 : Sığ toprak ısı değiştirici tipleri.	100
Şekil 4.2 : Sarmal, yatay ve düşey slinky ısı değiştiricisi uygulamaları.	101
Şekil 4.3 : Düşey helisel tipi ısı değiştiricisi uygulaması.	101
Şekil 4.4 : Serme alanı yerleşim planı.	102
Şekil 4.5 : 100m'lik farklı TID'leri için gerekli alanlar.	103
Şekil 4.6 : Yatay ısı değiştiricilerinin ısı yükünün test boyunca değişimi.	104
Şekil 4.7 : Normalize edilmiş test sonuçları.	105
Şekil 4.8 : Düşey helis kuyusunda net ısı yükünün zamana bağlı değişimi.	108
Şekil 4.9 : Yatay helis kuyusunda net ısı yükünün zamana bağlı değişimi.	109
Şekil 4.10 : Çoklu helisel uygulaması ve ısı olarak etkilenen alan.	110
Şekil A.1 : Pt100 sensör demeti ve kova içerisine daldırma.	130
Şekil A.2 : 1.1 kod numaralı sensör için test sonuçları elde edilen sapma ve en uygun doğrusal sapma eğrisi.	131
Şekil A.3 : TASO borusu ve kablolar.	133
Şekil A.4 : Sensör yuvası.	134
Şekil A.5 : Kablo ve sensörlerin yerleştirilme aşamaları.	134
Şekil A.6 : TASO'nun bitmiş durumdaki hali.	135
Şekil A.7 : İstanbul/Maslak 2012 yılı toprak altı sıcaklıklarının yıllık değişimi.	135
Şekil A.8 : İstanbul/Maslak 2012 yılı toprak altı sıcaklığının yıllık değişimi.	136
Şekil A.9 : İstanbul/Maslak 2013 yılı toprak altı sıcaklığının yıllık değişimi.	137
Şekil A.10 : İstanbul/Maslak 2014 yılı toprak altı sıcaklığının yıllık değişimi.	138
Şekil B.1 : 2'li kelepçe çizimleri.	140
Şekil B.2 : 4'lü kelepçe.	140
Şekil B.3 : Hazırlanan borular.	141
Şekil B.4 : Kelepçelerin ve sensörlerin borulara tutturulmuş hali.	141
Şekil B.5 : Sensör yerleşim yerleri.	142
Şekil B.6 : U borusunun kuyuya indirilmesi aşamasında kullanılan ağırlık.	143

Şekil B.7 : Kuyu açma işlemi	143
Şekil B.8 : Boru indirmede kullanılan makara	144
Şekil B.9 : Boru indirme işlemi	145
Şekil C.1 : Toprak Isı Değiştiricileri yerleşim planı.....	151
Şekil D.1 : Tez zaman cetveli	152

TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE YENİ BİR ISIL TEPKİ YÖNTEMİ VE PERFORMANSIN PARAMETRİK İNCELENMESİ

ÖZET

Yıllık toplam enerji tüketiminin %20'sinin ısıtma için harcadığı ülkemiz ve benzeri oranların olduğu dünyanın bir çok ülkesinde enerji fiyatlarının ve enerji tüketiminin doğaya etkilerine ilişkin farkındalığın artması nedeniyle, verimli ısıtma soğutma sistemlerine artan bir ihtiyaç ve ilgi bulunmaktadır. Isıtma ve soğutma için topraktan faydalanan ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına da entegre olabilen toprak kaynaklı ısı pompaları şu anda hem ısıtma hem de soğutmada en ekonomik sistemlerden biridir.

Toprak kaynaklı ısı pompalarının ekonomik olmasına rağmen ülkemizde yaygınlaşamamasının en önemli nedenlerinden biri ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Diğer bir önemli neden ise bilgi eksikliğinden kaynaklanan yanlış uygulamalar neticesinde oluşan güven kaybıdır.

Toprak kaynaklı ısı pompalarında ısıtılacak ortama aktarılan ısının büyük çoğunluğu (%70-80) topraktan geldiği için toprak tarafının planlanması önem arz etmektedir. Toprak altının yapısı çok değişkenlik gösterebilmekte; farklı toprak tabakaları, yeraltı su akışları, farklı nem içerikleri, çatlaklar veya boşluklar bulunabilmektedir. Bu nedenle toprak tarafı için ısı tepki testleri yapılmaktadır. Isıl tepki testleri yaklaşık 20 yıllık bir geçmişe sahip olmakla beraber halen geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Bu tez çalışması temel olarak iki konuya odaklanmıştır: İlk olarak geleneksel sabit ısı akıllı ısı tepki testine alternatif ve belirli avantajlar içeren sabit sıcaklıklı ısı tepki testi önerilmiş ve deneysel olarak çeşitli özellikteki toprak ısı değiştiricilerine uygulanmıştır.

Önerilen sabit sıcaklıklı test metodu için bir analitik model geliştirilmiş ve sayısal modellerle de doğrulanmıştır. Sabit sıcaklıkta test yapabilecek test sistemi laboratuvar ortamında kurulmuş, gerekli kalibrasyonlar, düzenlemeler yapıldıktan sonra farklı özelliklere sahip 4 kuyuda denenmiş ve toprak özellikleri belirlenmiştir. Sonuçların test sıcaklığına bağımlılığı da incelenmiştir. Uygun test suresi araştırılmış ve 24-36 saatlik testlerin yeterli olduğu görülmüştür. Geliştirilen model ile kuyuların hiç durmaksızın çalışması durumundaki performans değişimi elde edilmiştir.

İkinci olarak toprakla gerçekleşen ısı transferi incelenmiş ve bunu arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bunun için kuyudaki U borusunun sayısı, gidiş dönüş boruları arasındaki mesafe, boru çapı, kuyu derinliği gibi parametrelerin performansa etkileri incelenmiş, U borusu sayısını arttırmanın performansı oldukça iyi bir şekilde arttırdığı bulunmuş; bir kuyuda 3U borusu kullanmanın tek U ya göre %33 iyileşme sağlayacağı hem deneysel olarak hem de sayısal modellerle gösterilmiştir. U borusu sayısını daha fazla arttırmanın artan boru maliyetini karşılamayacağı görülmüş ve Türkiye fiyatları

için en iyi çözümün 2U borulu kuyu olduğu kısa ve uzun zamanlı analizler ile gösterilmiştir. Ancak boru maliyetlerinin düşmesi ile U borusu sayısını arttırmak maliyet-performans açısından tercih edilebilir olacaktır.

Yönetimi ve uygulaması sığ olanına göre daha zor olan derin kuyuların derinliğinin performansa etkisi 50 m ve 100 m derinlikli iki kuyu ile incelenmiştir. 100 m derinlikli kuyuda akışkan daha uzun süre kuyu içerisinde kalacağından gidiş ve dönüş boruları arasındaki sıcaklık farkının artmasına bağlı olarak ısı kısa devrelerin de artacağı ve birim kuyu derinliği başına elde edilecek ısı transferinin 50 m derinlikli kuyuya göre biraz daha az olacağı gösterilmiştir. Fakat ısı pompasının ısıtma modunda çalışması halinde toprağa soğuk akışkan gönderildiğinden geleneksel kuyulardan (20-200 m) daha derin olan kuyularda ortalama doğal toprak sıcaklığı yükseldiğinden ısıtma modunda yüksek performans elde edilebilir.

Ayrıca debinin arttırılmasının performansı kısmen arttıracığı fakat borudaki hız artışına karşılık pompa gücünün, debinin üçüncü kuvveti ile orantılı olarak artması nedeniyle toplam enerji tüketiminin hızla artması sonucu bu kısmi iyileşmenin etkinlik katsayısı (COP) üzerinde olumlu bir etkisinin gözlenemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Boru çapının etkisi için Ø32 mm'lik ve Ø40 mm'lik U borularına sahip iki kuyu kullanılmış, 40'lık boruda %4 civarında önemsenmeyecek bir iyileşme olduğu görülmüştür. Buna eş olarak borular arası mesafenin de performansa olumlu katkısı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla kuyu çapı değiştirilmeden boru çapını arttırmanın borular arasındaki mesafeyi de azaltması nedeniyle çap artışının olumlu etkisinin perdeleneyeceği anlaşılmıştır.

Çoklu kuyu alanlarındaki performans kayıplarını araştırmak için kuyuların performans kayıpları farklı kuyu dizilimleri ve çalışma sürelerinde kuyular arası mesafelere bağlı olarak incelenmiştir. Göz önüne alınan olabilecek en kötü senaryo için kuyular arasında 6 m aralık bırakılması durumunda bile kuyuları toplam performansındaki kaybının ihmal edilebilir değerlerde olduğu bulunmuştur.

Derin kuyulara alternatif olarak daha ucuza uygulanabilen sığ uygulamalar/yatay uygulamalardan en çok kullanılanları slinky, salyangoz ve helis tipi incelenmiş ve birim kanal uzunluğunda en iyi sonucu helis tipi toprak ısı değiştiricisi vermesine karşılık birim boru uzunluğunda en iyi sonucu salyangoz tipi toprak ısı değiştiricisinin, birim alanda düşey slinky tipi toprak ısı değiştiricisinin verdiği deneysel olarak gösterilmiştir.

A NEW THERMAL RESPONSE METHOD FOR GROUND HEAT EXCHANGERS AND PARAMETRIC INVESTIGATION OF THEIR PERFORMANCE

SUMMARY

Nearly %20 of annual energy consumption of our country is used for heating of spaces. In our country and other countries that have similar rates there are great interest to efficient heating and cooling systems because of increasing of energy prices and public awareness to increasing negative effect of energy consumption on nature. Ground source heat pumps (GSHP) that using ground for space heating and cooling and easily integrated to other renewable energy sources are the best economically systems for heating and cooling.

Despite the ground source heat pumps are one of the best economic systems for space heating and cooling they could not spread inside the country adequately. One of the reasons of not spreading inside the country is higher initial cost of the system build up. The other reason is loss of confidence caused from improper applications that also caused from insufficiency of information and trained staff.

In GSHP, because of the most of the heat (70-80%) transferred to spaces comes from the ground, designing of ground side is crucially important. Underground structure can varies widely depending on different ground strata, ground waters, different moisture contents, fractures, and gaps. Therefore in situ thermal response tests are necessary and used to obtain information about ground side. With thermal response tests thermal conductivity of the ground and borehole resistance can be obtained. In conventional thermal response tests constant heat flux is injected in the ground for about 48-50 hours. Thermal response test have nearly 20 years background, improvements on it still continuing.

Before the start this thesis, working plan is prepared, and to do studies a laboratory was built up and different kind of boreholes are drilled, horizontal ground heat exchangers are applied and test setup is built in laboratory. 6 boreholes having different properties like; pipe diameter, distance between pipes, number of U-tubes, depths are prepared. In horizontal ground heat exchangers, slinky, snail, and helix types are applied. To see yearly temperature variations inside the ground a 20 m borehole is drilled and 15 unit temperature sensors located to different depths of borehole and 3 year data are obtained with this system up to today. In the application of boreholes we developed our special spacers and to fill the gaps in borehole one of the best grout recipe *MixIII* is used and grout is pumped to the borehole from bottom to top. Furthermore for lowering of ground heat exchanger we prepared a lowering reel and used in the application processes. For numerical analysis *Comsol* computer program which uses the finite element method is used. With the numerical model, experimental results are validated. Mainly this thesis focused on two topics:

Firstly as an alternative to conventional constant heat flux thermal response test, constant temperature thermal response test which has some specific advantages is proposed and applied to boreholes which have different properties.

For proposed thermal response test, an analytical model is developed for modeling and interpreting at injecting constant temperature tests. In this method similar to conventional thermal response test, constant temperature fluid is sent to the borehole during the test. After a period of time in the test steady state conditions can be assumed in the borehole. In a borehole there are more pipes and analytical solution is more difficult to use than numerical ones. To solve the problem analytically equivalent diameter approximations is used. In the equivalent pipe constant temperature boundary conditions is assumed and then by knowing grout properties, effective thermal conductivity and borehole resistance are estimated.

A test station is set up in the laboratory for the constant temperature thermal response test. By using the analytical model, effective thermal conductivity of ground obtained for four different boreholes. For a borehole long term performance prediction is calculated assuming the worst case. Furthermore optimum test duration is investigated for constant temperature thermal response test and found that even 24-36 h test duration is found to be enough to obtain reliable results.

Because of the length of boreholes in a GSHP system, application is very important, it is better to consider the worst case during the determination. Therefore the method used in this work can be used for determining the thermal conductivity of ground and required borehole length and can predict long term heat transfer rate of boreholes in GSHP applications. On the other hand in this study 1U-tube boreholes considered with suitable equivalent radius approximation to simplify the problem.

Secondly heat transfer mechanisms between circulating fluid and ground is analyzed, studies are aimed increasing the heat transfer rate. Therefore effects of number of U-tubes, distance between inlet and outlet pipes, diameter of pipe, depth of borehole on the heat transfer rate are examined.

Effects of number of U-tubes on both time variation of borehole performance (unit HTR value) and initial cost are experimentally and computationally examined. Results show that 2U and 3U-tube configurations have 14% and 25% better performance in comparison with that of 1U-tube configuration for the averaged values of 16 weeks non-stop operation (as a worst case). The computational model is calibrated by considering the experimental results and then 4U-tube and 5U-tube configurations are computationally investigated. Performance increments are remarkable for 2U-tube and 3U-tube configurations while it is nearly insignificant for 4U and 5U ones. When the initial cost per thermal power of a borehole is considered, the optimal configuration is 2U-tube configuration if the prices in Turkey are taken into account. 2U-tube configuration is 8% cheaper than 1U-tube one for the same heat load. On the other hand, this percentage depends on the ratio of cost of polyethylene pipes to the total cost. If the cost of polyethylene pipes decreases, then 3U-tube or even 4U-tube configuration can be the cheapest solution. When the application area is considered, 3U-tube configuration constitutes an optimum solution since increments in unit HTR values are too small for 4U and 5U-tube configurations. Furthermore, it is seen that advantage of multi-U tube configurations decreases with increasing operational time period due to faster change in temperature of ground surrounding borehole. Therefore, it is necessary to keep longer distance between boreholes in case of multi U-tube

configurations to allow recovering undisturbed ground temperature during non-operational time period.

Effects of depths to performance in deep boreholes are also examined by using two boreholes having 50 m and 100 m. During the test fluid stays longer time inside the pipe in a 100 m deep borehole than a 50 m deep borehole. Therefore temperature difference between the inlet and outlet pipes increases and this causes higher thermal shortcuts between the pipes. For these reasons the unit heat transfer rate in the 100 m borehole will be lower than that in 50m borehole. However when the heat pump runs in heating mode, cold fluid is sent to borehole, and the average ground temperature will be higher in deeper borehole (>200m) therefore in heating mode a high performance is obtainable.

Furthermore increasing of flowrate increases performance partially, however response to increasing of velocity, pumping energy also increases 3 times, then increasing of flowrate will be ineffective for the overall performance of system. Because of pump power increases 3 times with flowrate and consequently total power consumption increases, therefore this partial improvement does not effect on COP of overall system.

To see the effect of pipe diameter on performance of borehole two boreholes which have Ø32 mm and Ø40 mm diameter U-tubes are used. In the borehole which has Ø40 mm U-tube shows 4% better performance. However size of increment may count as insignificant. At the same time increasing the distance between pipes effects the performance positively. Hence increasing pipe diameter without changing borehole diameter decreases also distance between the pipes, then positive effect of increasing of pipe is curtained by the decreasing of distance between the pipes.

Furthermore shallow ground heat exchangers are investigated experimentally. The performances of different shallow ground heat exchangers (snail, slinky and helix) are compared. Results show that snail ground heat exchanger is the best in terms of heat transfer rate per unit pipe length, while vertical helix gives the best results for heat transfer rate per unit application area. In the cost analysis, vertical slinky gives the best result in terms of heat transfer rate per unit investment cost. These costs are taken from the costs in experimental study in the application area. Since costs may change from region to region the results may also be changed. If we comparing these results with vertical boreholes we see that because vertical boreholes with U-tube do not affected seasonal temperature fluctuations they have better heat transfer rate. Also vertical boreholes need very small application area and are better in terms of unit application area, but their cost is higher than those of all horizontal ground heat exchangers.

1. GİRİŞ

Alan ısıtmada doğalgaz, petrol ve kömür gibi hidrokarbonları doğrudan yakan geleneksel sistemlerin yanısıra, elektrik enerjisi yardımıyla herhangi diğer bir kaynaktan ısı çekerek ısıtılacak alana aktarabilen sistemler de vardır. Bunlar daha düşük sıcaklığa sahip ortamdan ısı çekerek daha yüksek sıcaklıktaki ısıtılacak alana, ısıyı pompalayan sistemlerdir. Bu sistemler genelde *ısı pompası* olarak isimlendirilir. Isı pompası; klima, buzdolabı, su soğutucu (chiller) gibi sistemlerle aynı prensipte çalışır fakat kullanım amaçlarına göre değişik isimlendirmelere sahip olmaktadır.

Isı pompasının tarihi soğutmanın tarihi ile bağlantılıdır. Tarihte, sadece aristokratların sofralarını süsleyen buz, zenginliğin göstergesiydi. Eski devirlerde kış aylarında toprak altına depolanarak yaz aylarında kullanılmaya çalışılan buz, 19.yüzyılın başlarından itibaren denizler üzerinden taşınmaya başlanmış ve buz ticareti yüzyılın sonuna doğru yılda 500.000 ton buz nakli yapılacak seviyeye gelmiştir. Buz nakilleri çok zorlu olmakta, aylar sürmekte ve yola çıkan buz kütesinin ancak üçte biri yolculuğun sonuna ulaşmaktaydı. Sanayi devrimi sırasında her türlü makineleşmenin artması ile beraber artan buz ve soğutma ihtiyacını karşılayacak makineler üzerine de ciddi çalışmalar yapılmıştır. Bir adyabatik sistemde gazların sıkıştırılmasıyla sıcaklığının arttığı, genişlemesiyle sıcaklığının düştüğü *Robert Boyle'un* 1662 yılında yayınlanan kitabından bilinen bir olaydı. Kaynaklar ilk buzdolabının Amerikalı mühendis *Oliver Evans* (1755-1819) tarafından geliştirildiğinde ittifak halindedir. *Oliver Evans* 1805 yılında sıkıştırma-genişleme mekanizması ile çalışan buzdolabını tasarlamış fakat üretimini yapamamıştır. Teorik olarak ısı pompası fikrini ilk olarak 1824 yılında Fransız askeri memur *Sadi Carnot* yazdığı kitabında vermiştir. 1834 yılında Amerika doğumlu *Jacob Perkins* ise eter kullanan, sıkıştırma ve genişleme ile çalışan, sıkıştırma işlemi için gerekli enerjiyi nehirden alan bir soğutma cihazının patentini almıştır. 1850'li yıllarda İrlandalı bilim adamı *Joule Thompson* (*Lord Kelvin*) tarafından ısı pompası teorisi geliştirilmiştir. Daha sonra aynı yıllarda ilk ısı pompaları birbirinden bağımsız olarak Amerikalı doktor *John Gorrie* (1803-1855), Avusturyalı *Peter Ritter von Rittinger* ve Fransız *Carre* kardeşler tarafından geliştirilmiştir. İlk

patentli toprak kaynaklı ısı pompası ise 1912 yılında İsviçreli mühendis *Heinrich Zoelly* tarafından alınmıştır.

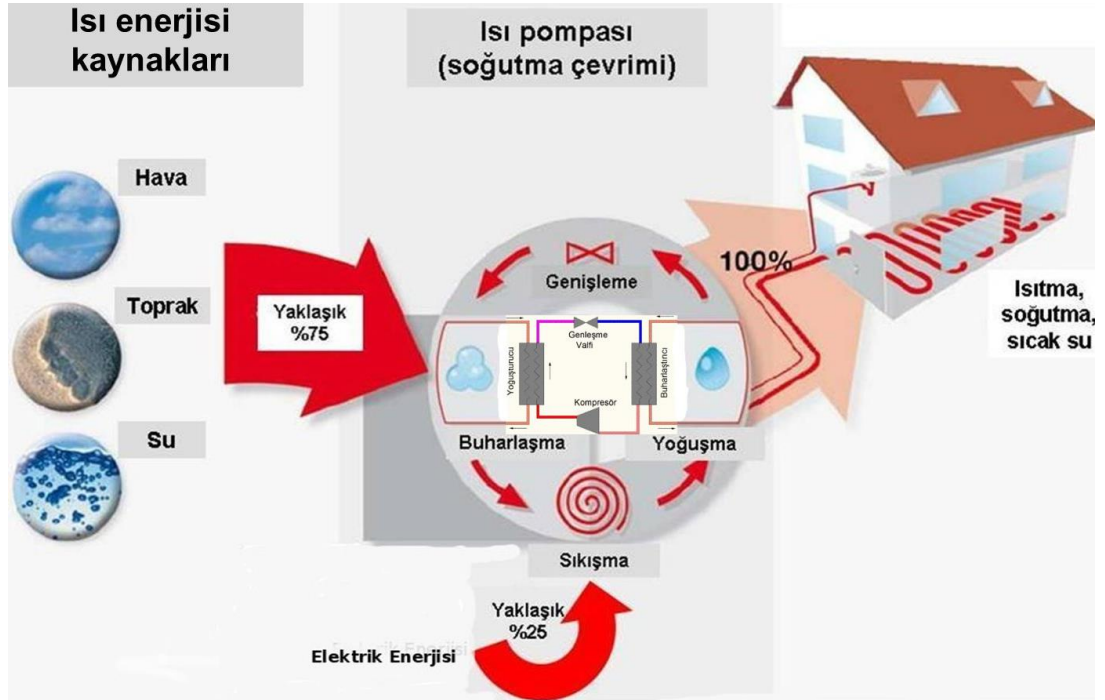
1950'li yıllara doğru yaygınlaşan ısı pompaları daha çok 1970'li yıllarda enerji krizi zamanında artışa geçmiş fakat daha sonraki yıllarda diğer sistemlerden daha maliyetli olması nedeniyle çok fazla ilgi görmese de son yıllarda teknolojinin gelişmesi, enerji fiyatlarının artması ve doğaya olan duyarlılığın artması sonucu gün geçtikçe artan bir ilgiye sahiptirler.

1.1 Isı Pompasının Çalışma Prensibi

Termodinamiğin ikinci kanunu gereği ısı, sıcak ortamdaki soğuk ortama kendiliğinden akar. Görece soğuk olan bir ortamdan sıcak bir ortama ısı aktarmak ancak bir ısı pompası ile gerçekleştirilebilir. Hava, su ve toprak gibi içerisinden ısı çekilmesi ile sıcaklığının pratik olarak değişmeyeceği büyük ısı kaynaklarından ısı pompası vasıtasıyla ısı çekilebilir.

Buhar sıkıştırılmalı ısı pompası bir kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve genişleme vanasından oluşur (Şekil 1.1). *Kompresör* gazın geniş bir hacimden dar bir hacme güç kullanarak sıkıştırılmasını, genişleme vanası ise kompresörün tersine gazın dar hacimden geniş hacme genişlemesini sağlar. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu ise değişik fonksiyonları olan ısı değiştiricileridir. *Isı değiştiricisi*, farklı sıcaklıklardaki iki akışkanın birbirine temas etmeden dolaştığı ve bu sayede sıcak olanın soğuk olana ısını aktardığı bir cihazdır. Bu bileşenler birbirlerine bakır borular ile bağlanır ve arada bir akışkan dolaşır ve *soğutucu akışkan* olarak isimlendirilir. Sistemin bir tarafında akışkan gaz halinde sıkıştırılırken ısınmakta, daha sonra tekrar ilk başlangıç basıncına dönme durumunda ise soğumaktadır. Soğutucu akışkan, sıkıştırma işlemi yapan kompresörün giriş ve çıkışında gaz halindedir. Gaz halinde bulunan soğutucu akışkan, kompresörde güç kullanılarak daha küçük bir hacme sıkıştırılır. Böylece gazın basıncı ve sıcaklığı artar. Yüksek sıcaklıktaki akışkan ısını ısı değiştiricisi vasıtasıyla diğer tarafta dolaşan akışkana vererek yoğuşur ve sıvı hale gelir. Bu ısı değiştiricisine *yoğuşturucu* adı verilir. Yoğuşturucudan çıkan yüksek basınçtaki akışkan genişleme vanasından geçerek basıncı düşer. *Genişleme vanasında* da kompresörün tam tersi bir işlem gerçekleşir ve akışkan dar bir hacimden geniş bir hacme geçer. Bu geçiş sırasında akışkanın basıncı kompresör giriş basıncı değerine düşer. Soğutucu akışkan kompresördeki sıkıştırma işlemi sırasında aldığı enerjide

dahil olmak üzere yoğuşturucuda büyük miktarda enerjiyi ısı transferi ile kaybettiğinden genleşme sonunda çok daha düşük sıcaklıklara¹ iner. Düşük sıcaklıklara düşen soğutucu akışkan görece daha yüksek sıcaklıklarda olan ısı kaynaklarından (hava, su, toprak) ısı alabilir. Bunun için arada bir ısı değiştiricisi kullanılarak bir tarafında soğutucu akışkan diğer tarafında kaynak tarafından gelen başka bir çevrim ile ısı geçişi gerçekleşir. Soğutucu akışkan ısıyı aldıktan sonra tekrar gaz haline gelir yani buharlaşır. Bu işlemleri yapan ısı değiştiricisine de *buharlaştırıcı* adı verilir.



Şekil 1.1 : Isı pompası çalışma prensibi (Url-1).

1.2 Etkinlik Katsayısı (COP)

Etkinlik katsayısı sistemin kalitesini belirler. Hesaplanmasında sistemden elde edilen enerjinin sisteme giren enerjiye oranı ile bulunur (Şekil 1.2).

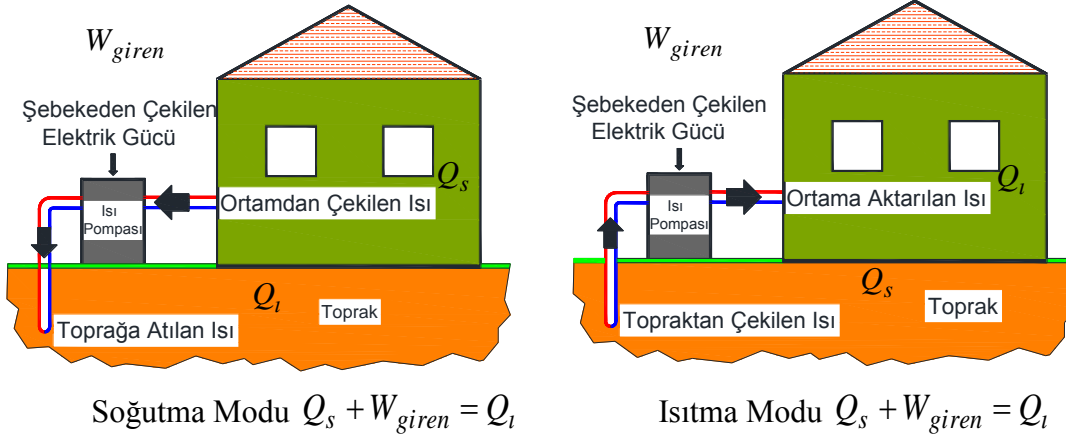
$$COP = \frac{\text{Pompalanan ısı enerjisi}}{\text{Tüketilen enerji}} \quad (1.1)$$

Isı pompalarında ısıtma ve soğutma durumları için ayrı olarak hesaplanır.

¹ 410A ile çalışan ısı pompasında B0/W35 (0°C giriş 35°C çıkış) koşullarında -8 °C dir

$$\text{COP}_{\text{ısıtma}} = \frac{\text{Ortama pompalanan ısı enerjisi}}{\text{Tüketilen enerji}} = \frac{Q_i}{W_{giren}} \quad (1.2)$$

$$\text{COP}_{\text{soğutma}} = \frac{\text{Ortamdan pompalanan ısı enerjisi}}{\text{Tüketilen enerji}} = \frac{Q_s}{W_{giren}} \quad (1.3)$$



Şekil 1.2 : Isıtma ve soğutma modunda çalışan toprak kaynaklı ısı pompalarında ısı transfer mekanizmaları.

Isıtma ve soğutma COP değerleri arasındaki bağıntı ise şu şekildedir:

$$\text{COP}_{\text{ısıtma}} = \frac{Q_i}{W_{giren}} = \frac{Q_i}{Q_i - Q_s} = \frac{1}{1 - Q_s / Q_i} \quad (1.4)$$

$$\text{COP}_{\text{soğutma}} = \frac{Q_s}{W_{giren}} = \frac{Q_s}{Q_i - Q_s} = \frac{1}{Q_i / Q_s - 1} \quad (1.5)$$

$$\text{COP}_{\text{ısıtma}} = \text{COP}_{\text{soğutma}} + 1 \quad (1.6)$$

Burada verilen değerler anlık COP değerleridir ve ısı pompalarının performansları hakkında bilgi verir. Fakat ısı pompası planlama işlemlerinde bir sezon boyunca pompalanan enerjinin tüketilen enerjiye oranı kullanılır. Elde edilen bu değere de *sezonal COP* (sCOP) adı verilir.

1.3 Isı Pompası Tipleri

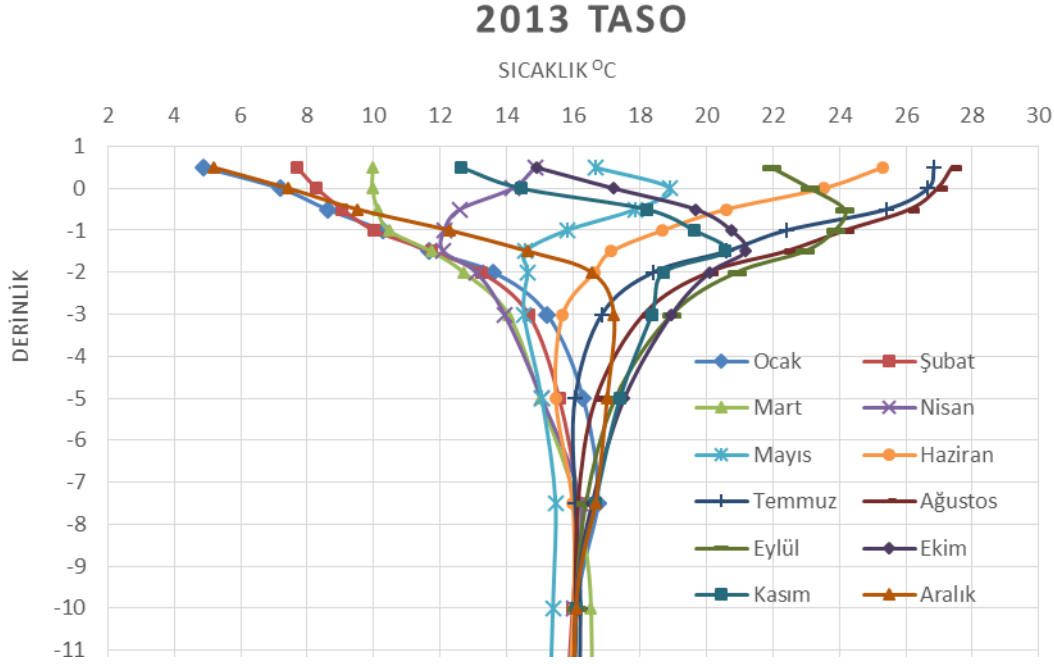
Isı pompaları, ısı alınan veya ısı atılan kaynağa göre *hava, su* yada *toprak kaynaklı ısı pompaları* olarak isimlendirilir. Su kaynaklı ısı pompası uygulanacak yerin yakınında bir su kaynağı olması durumunda kullanılır. Bu su kaynağı, deniz, göl, akarsu vb. olabilir. Fakat hava ve toprak kaynaklı ısı pompası her yerde uygulanabilir. Hava kaynaklı ısı pompası kışın iç alanlara görece daha soğuk, yazın ise görece daha sıcak olan hava ile ısı alışverişi yaptığı için performansı toprak kaynaklı olana göre daha düşüktür. Örnek olarak hava kaynaklı ısı pompalarının etkinlik katsayıları (COP) 2-3 seviyesinde iken toprak kaynaklı ısı pompalarında bu değer 4'e hatta 5'e kadar çıkabilmektedir. Böylece etkinlik katsayısı (COP değeri) 4.5 olan² normal toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminde ısıtılacak ortama aktarılan ısının %78'i topraktan gelmektedir. Bunun yanında toprak kaynaklı ısı pompası her yerde uygulanabilir olması ve daha geniş kullanım alanı olması nedeniyle daha yaygın kullanım potansiyeline de sahiptir. Toprak kaynaklı ısı pompası (TOKIP) sistemi birçok kaynak tarafından en verimli ısıtma sistemi olarak belirtilmektedir. (USEPA, 2008; Min ve Lai, 2012; Self vd., 2013).

1.4 Toprağın Isı Kaynakları

Topraktaki ısının iki temel kaynağı vardır. Bunlardan *birincisi* güneş enerjisidir. Toprak yaz boyu güneşlenerek elde ettiği ısı enerjisini yüzeyinde depolar. Kış aylarında, depolanan bu ısıda belirli bir oranda azalma olur fakat çoğu zaman toprağın ısı özelliklerine ve atmosferik koşullara da bağlı olarak toprak, ısısının tamamını vermeden yaz ayı gelir. Yazın toprak tekrar ısınarak eski haline gelir. Şekil 1.3'te toprakaltı sıcaklığının derinliğe bağlı olarak sıcaklık değişimini veren her biri bir ayı temsil eden eğriler görülmektedir. Toprağın derinlerine inildikçe yüzeyde kalan toprağın artan kütlesi nedeniyle ısı atalet artar ve bu nedenle alt tabakalar değişen yüzey koşullarından daha az etkilenir. Belli bir derinlikten sonra belirli bir sıcaklıkta sabitlenir mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmez. Bu çalışma kapsamında ölçülen değerlere göre İstanbul için bu değer Şekil 1.3'te görüldüğü gibi ~16°C alınabilir. Bu sıcaklık genelde o bölgenin yıllık ortalama hava sıcaklığının biraz üzerindedir.

² Isı pompasına giriş akışkan sıcaklığı 0°C çıkış akışkan sıcaklığı 35°C olması durumunda ortalama bir ısı pompasının COP değeridir. Günümüzde 5 değerine ulaşanları da mevcuttur.

Toprağın ısı kaynaklarından *ikincisi* ise dünyanın merkezinde bulunan yüksek sıcaklıktaki çekirdek tabakasıdır. Dünyanın çekirdek tabakası büyük oranda demir ve nikel içermektedir. Çekirdek tabakasındaki yüksek sıcaklığın etkisi ile toprakta derinlere inildikçe sıcaklık değeri yaklaşık olarak $0.025 \text{ }^\circ\text{C/m}$ (Epri, 1978) oranında artar.



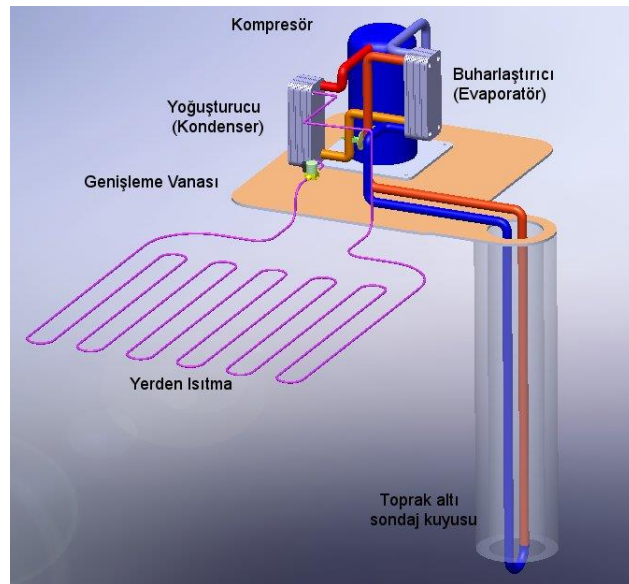
Şekil 1.3 : Toprak sıcaklığının *İstanbul/Maslak* için farklı aylarda derinlikle değişimi.

Çekirdek tabakasından dünya yüzeyine gelen ısı miktarı hesaplamalara göre 44 TW tır (Banks, 2008; Dickson ve Fanelli, 2004). Bu ısının yıllık toplamı dünyanın yıllık toplam enerji tüketiminin üç katına karşılık gelmekle (Url-2) birlikte dünyanın toplam yüzölçümüne bölüldüğünde küresel ortalama ısı akısı 0.086 W/m^2 olarak elde edilir. Bu nedenle toprak kaynaklı ısı pompaları bilinenin aksine jeotermal enerjiden pratik olarak yararlanmaz. Çünkü jeotermal ısı akısı, ısı pompalarının talep ettiği ısıyı karşılamaktan oldukça uzak küçük bir değerdir. Sonuç olarak ne toprağın yüzeyini ısıtan güneş enerjisi ne de dünyanın merkezinden yüzeyine olan jeotermal ısı akısı toprak kaynaklı ısı pompalarının ısı talebini karşılamaz. Gerçekte olan toprağın büyük bir ısı rezervuarı olarak kullanımındır, yani toprak dev bir ısı deposu olarak davranır.

1.5 Isı Deposu Olarak Toprağı Kullanmak

Şekil 1.3'ten görüldüğü gibi kış aylarındaki toprağın yüzey sıcaklığı konfor şartlarındaki oda sıcaklığından³ (ANSI, ASHRAE 2004) daha düşük olduğundan topraktaki ısıyı çekmek için arada bir ısı pompası kullanılmalıdır. Bunun için toprak yüzeyinden çok derin olmayacak şekilde toprağa borular serilerek üzeri kapatılır. *Yatay ısı değiştiricileri*, serme yöntemi vb. isimlerle de adlandırılan bu sistemde boruların gömme derinliği 1.5-2.5 m arasında değişmektedir ve bu derinliklerdeki toprak tabakası Şekil 1.3'ten de görülebileceği gibi hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir, bu nedenle performansı düşey sistemlerden daha düşüktür. Hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyecek derinliklerdeki ısıyı almak için ise bir kuyu açılmalıdır. Jeotermal amaçla kullanılan kuyular derin sondajlar yüksek maliyetler gerektirmektedir. Daha az derinlikteki kuyular ile toprak altındaki ısı enerjisi ısı pompasında kullanılabilir, bu sistemler de *düşey ısı değiştiricileri*, *ısı kuyuları* vb. şekilde adlandırılır.

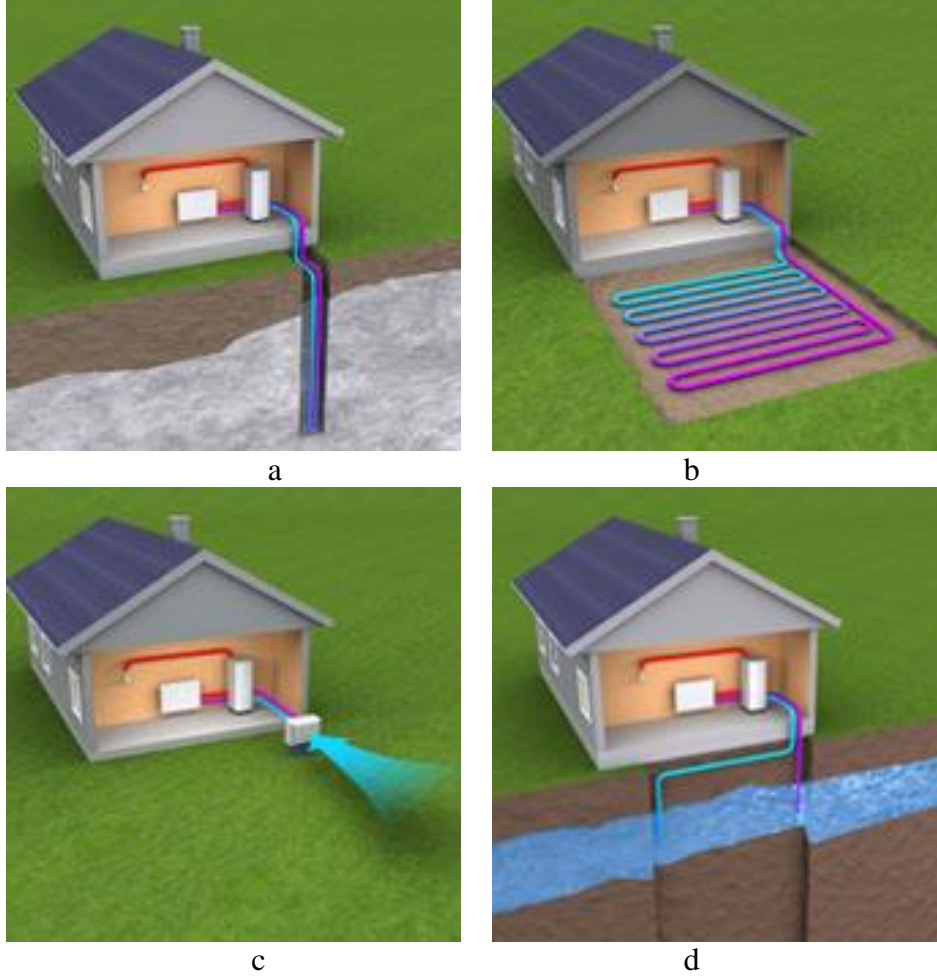
Düşey ısı değiştiricilerinde ısı çekme işlemi temel olarak iki şekilde gerçekleşebilir. İlk olarak yüzeydeki ısıyı almaya benzer şekilde kapalı bir çevrimde U borusu içerisinde dolaşan akışkan vasıtasıyla derinliklerdeki ısı, ısı pompasına oradan da ısıtılacak ortama aktarılır. Bu şekilde çalışan sisteme *kapalı sistem* denir. (Şekil 1.4)



Şekil 1.4 : Düşey toprak altı ısı değiştiricisinin ısı pompasında kullanımı.

³ Konfor sıcaklıkları kullanıma göre değişim gösterir, yaz şartlarında 23.5-28 °C kış şartlarında 19-26.5 °C olarak alınır.

İkinci yöntemde ise toprak altındaki yeraltı suyu doğrudan ısı pompasına bağlanır. İkinci yöntem *açık sistem* olarak isimlendirilir ve yeraltı suyunun sıcaklığına bağlı olarak verimi diğerlerinden daha yüksek olabilir (Şekil 1.5d). Bu sistemde açılacak kuyudan çıkan su analiz edilmeli, uygun ısı değiştiricisi kullanarak ısı pompasına bağlanmalıdır.



Şekil 1.5 : a) Kapalı düşey toprak, b) kapalı yatay toprak, c) hava ve d) açık su kaynaklı ısı pompalarının görsel temsilleri (Ur1-3).

Bu iki sistemin yanında, soğutucu akışkanın, buharlaştırıcı yerine bakır borular içerisinde toprağa gönderildiği *doğrudan genişlemeli*⁴, toprak altı kuyusu içerisinde topraktaki doğal sıcaklık farkına bağlı olarak çalışan ve arada bir dolaşım pompası gerektirmeyen ısı borusu⁵ şeklinde çalışan ve genelde CO₂ kullanılan *gaz çevrimli*, toprakta akışkan olarak havanın dolaştığı ve dolaşan havanın bina içerisine verildiği *hava-toprak ısı değiştiricili* sistemler de vardır. Ayrıca toprak ısı değiştiricileri sadece

⁴ Direct Expansion, DX system

⁵ Heat pipe

boş alanlara değil binanın temeline de uygulanabilmektedir. Bunlarda *enerji kazıkları*, *temel ısı kazıkları* olarak da isimlendirilmektedir. Bu sistemler bu tez kapsamı dışında olduğundan bu konularla ilgili burada detaylı bilgi verilmeyecektir. Detaylı bilgi Banks (2012) ve Egg ve Howard (2011) vb. kaynaklarından edinilebilir.

1.6 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantajları

Toprak kaynaklı ısı pompasının avantajlarını enerji dönüşümü açısından, son kullanıcı açısından ve çevre açısından ayrı olarak incelenebilir.

1.6.1 Enerji dönüşümü açısından

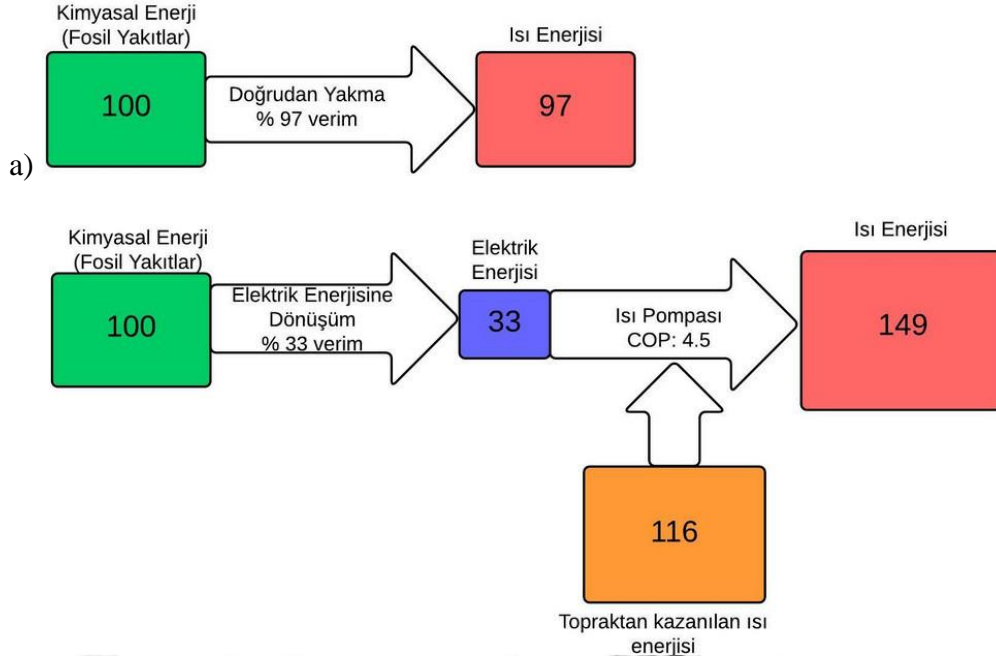
100 birim ısı enerjisi verme potansiyeline sahip olan birincil enerjinin (doğal gaz, petrol, kömür) şu an olabilecek en yüksek verimle (~%97) doğrudan yakılması durumunda elde edilecek ısı enerjisi doğal olarak 97 birim olacaktır. Öte yandan 100 birimlik birincil enerjinin önce %33 verimle⁶ elektrik enerjisine daha sonra bu enerjinin etkinlik katsayısı 4.5 olan standart bir toprak kaynaklı ısı pompasında kullanımıyla 33 birimlik elektrik enerjisi ile $33 \times 4.5 = 149$ birim ısı enerjisi elde edilir. Böylece en az 52 birim (%54) daha fazla ısı elde edilmiş olur. (Şekil 1.6)

Böylece örneğin doğal gazı kazan ya da kombilerde doğrudan yakarak ısıtma elde etmek yerine önce doğal gaz santrallerinde elektrik üretmek ve sonra bu elektrik enerjisinin ısı pompasında kullanımıyla topraktan ısı çekerek ısıtma elde etmek enerji verimliliği açısından doğrudan yakmaya göre %54 daha verimlidir.

1.6.2 Son kullanıcıya maliyeti açısından

Çizelge 1.1'de ısıtmada kullanılan enerji tipleri ve bunların son kullanıcıya yönelik 1000 kcal ısı enerjisi verme maliyetleri görülmektedir. Çizelgeden de görülebileceği gibi doğrudan ısıtma amaçlı en ucuz enerjiler doğal gaz ve ithal linyit olarak görülmektedir. Kömürün kullanımında atmosfere zararlı gazlar bırakması, otomasyona çok uygun olmaması sebebiyle ülkemizde çoğunlukla doğalgaz kullanılmaktadır. Fakat listenin en sonuna bir satır daha ekleyerek toprak kaynaklı ısıtma sistemi ile 1000 kcal ısı enerjisi elde etmenin maliyetini hesaplırsak:

⁶ En düşük olan verime göre hesaplama yapılmıştır. Daha yüksek verimde çalışan ve kojenerasyon benzeri sistemler içeren dönüşüm santrallerinde daha yüksek performans değerleri elde edilmektedir.



Şekil 1.6 : a) 1. yol: Fosil yakıtların doğrudan yakılması ile ısı enerjisi üretilmesi, b) 2. yol: Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi elde edilerek ısı pompası yardımıyla ısı enerjisi üretilmesi.

COP değeri 4.5 olan standart bir toprak kaynaklı ısı pompası ile 1 birim elektrik enerjisi ile 4.5 birimlik ısı enerjisi elde edilir. 1000 kcal (1.16 kWh) ısı enerjisi elde etmek için $1.16 / 4.5 = 0.258$ kWh elektrik enerjisi harcanacaktır. 1 kWh elektrik enerjisi maliyeti çizelgeden görülebileceği gibi 0.3105 TL/kWh olduğuna göre toprak kaynaklı ısı pompası ile 1000 kcal ısı enerjisi elde etmenin maliyeti $0.258 \times 0.3105 = 0.0801$ TL olacaktır.

Çizelge 1.1 : Son kullanıcıya yönelik birim ısıtma maliyetleri (Url-4).

No	Yakıt Adı	Isıl Değeri	Birim Fiyatı	Verim	TL/1000Kcal
1	Doğalgaz (Konut)	8250 kcal/m ³	1.0064 TL/m ³	90	0.1355
2	Linyit (İthal)	6000 kcal/kg	0.7119 TL/kg	65	0.1825
3	Fuel-oil 4(K.Yakıtı)	9700 kcal/m ³	1.9300 TL/m ³	80	0.2487
4	Elektrik	860 kcal/kwh	0.3105 TL/kWh	99	0.3647
5	LPG Propan	11000 kcal/m ³	4.2857 TL/m ³	90	0.4329
6	Motorin	10200 kcal/kg	4.0476 TL/kg	84	0.4724
7	Tüpgaz	11000 kcal/m ³	4.9788 TL/m ³	88	0.5143
Toprak Kaynaklı Isı Pompası			COP 4.5		0.0801

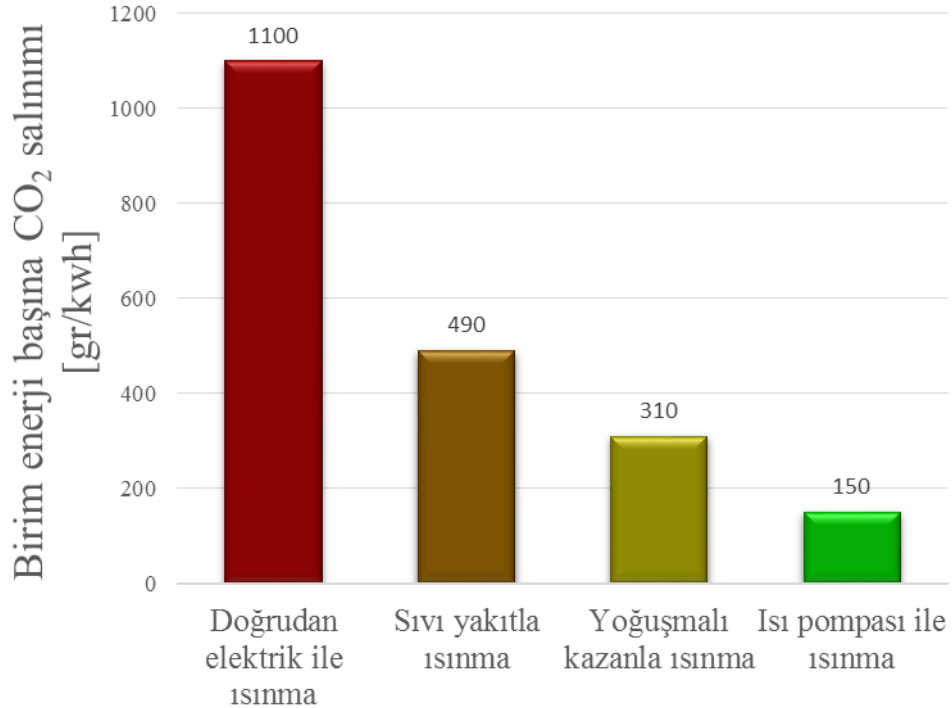
Diğer bir deyişle ısınma maliyeti açısından doğal gazlı ısınmaya göre ekonomik kazanç %40 olmaktadır. Enerji kaynaklarından ısı enerjisi üretme maliyetlerine bakılacak olursa elektrik ile doğrudan ısı enerjisi elde etmenin maliyeti ile doğal

gazdan elde etmenin maliyeti arasında 2.7'lik bir oran (0.3647/0.1355) vardır. Buna göre etkinlik katsayısı (COP) 2.7'nin üzerinde olan sistemler bu fiyatlar üzerinden hesaplanırsa, doğal gazdan daha ekonomik olmaktadır. Avrupa ortalaması ise 2.8 dir (Self vd., 2013). Diğer bir deyişle ısıtma COP değeri 2.8'in üzerinde olan cihazlar doğal gazlı sistemlerden daha ekonomik ısıtma sağlayabilmektedir.

Yaz sezonunda da toprak kaynaklı sistem kullanılarak klasik klimalara göre daha az elektrik tüketerek konutların soğutulması sağlanabilir. Ayrıca ısı pompası kullanılmadan sadece suyu, topraktaki borular içerisinde dolaştırarak devridaim pompası ve iç fanların enerji tüketimi ile soğutma yapılabilir. Bu işlemde ısı pompası pasif kaldığı için bu yöntem *pasif soğutma* olarak da adlandırılır. Bu sistem ile kullanıcıya özellikle ısıtmada ekonomik ve alternatif bir çözüm sağlanarak doğal gazdaki olası kesinti ve zamlardan da etkilenmeme imkânı sunulabilmektedir.

1.6.3 Çevre açısından

Toprak kaynaklı ısı pompaları aynı ısı enerjisini doğrudan yakmaya göre daha az fosil yakıtla elde etme imkânı sağlaması, soğutmada da daha verimli bir soğutma sistemi oluşturması nedenleriyle sera gazı salınımlarının azalmasına önemli bir katkı sağlamaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 : Farklı ısınma sistemlerinde CO₂ salınım oranları (Url-5).

Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile *sıfır CO₂ salınımı olan ısıtma ve soğutma* sağlanabilir.

1.7 İklimin Etkisi

Toprak kaynaklı ısı pompası hava kaynaklı ısı pompasından farklı olarak, toprak altı sıcaklıkları daha kararlı olduğu için her bölgeye uygulanabilir. Toprak kaynaklı ısı pompasında toprağa atılan ısı ile çekilen ısı arasında bir denge olması gerekir. Toprağın ısı yayılım değerleri düşük olduğu için ısı çekildikten veya ısı atıldıktan sonra toprağın doğal sıcaklığına gelmesi zaman alır. Bu sebeple toplam ısı dengesi açısından yıllık toprağa atılan ile çekilen ısı arasında bir denge olmalıdır. Mevsimsel ısıtma ve soğutma yüklerinin aynı olduğu durumda, kompresörde tüketilen elektrik enerjisi de ısıya dönüştüğünden ısıtma modunda topraktan çekilen ısı soğutma modunda toprağa atılan ısı enerjisine göre daha az olacaktır. Bu durum ilerleyen zaman içerisinde toprakta ısı birikmesine ve toprak sıcaklığının artarak ısıtma modunda verimin artmasına ancak buna karşılık soğutma modunda da verimin düşmesine yol açacaktır. Bu nedenle topraktan çekilen ısı ile toprağa basılan ısı değerlerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olması en idealidir. Soğutma ihtiyacının olmadığı yerlerde ise yaz aylarında toprağa ısı basılarak veya kuyular seyrek yerleştirilerek ya da gereğinden daha uzun tutularak toplam ısı kapasitesinin büyük tutulmasıyla ilerleyen yıllarda TID bölgesinde toprak sıcaklığındaki ve dolayısıyla verimdeki düşüş önlenir.

1.8 Toprak Isı Değiştiricileri ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde ısıtılacak ortama aktarılan ısının büyük bir kısmı topraktan geldiğinden toprak kısmının iyi bir şekilde planlanması sistemin verimliliği, güvenilirliği ve uzun ömürlü olması açısından hayati önem taşımaktadır.

Toprak tarafının planlanmasında en önemli ölçüt, toprağın ısı iletkenlik ve ısı yayılım değerleri ile düşey sistemlerde *kuyu direnci*dir. Toprağın ısı iletkenliği, doğal sıcaklığı ve akışkan sıcaklıklarının bilinmesiyle kuyu direnci bulunabilir ve gerekli toprak altı borulama uzunlukları çıkartılabilir (ASHRAE, 2011). Toprağın ısı iletkenlik değeri alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar ölçümü ile bulunabildiği gibi jeotermal ısı akısı haritalarının olduğu bölgelerde içi su dolu kuyu içerisine daldırılan bir sensör ile toprağın derinliğe bağlı sıcaklık değişim eğrisi çıkartılarak

denklem (1.7) yardımıyla da bulunabilir (Rohner vd., 2005; Raymond ve Lamarche, 2014).

$$\vec{J}_Q = -k_t \vec{\nabla} T \quad (1.7)$$

Burada \vec{J}_Q jeotermal ısı akısını, k_t toprağın ısı iletkenliğini, $\vec{\nabla} T$ sıcaklık gradyenini göstermektedir. Bu yöntem *termostratigrafik* yöntemi olarak bilinir ve jeotermal ısı akısının iyi bir doğrulukla haritalandığı *Kuzey-Doğu Amerika* gibi yerlerde ısı iletkenlik bu yolla tahmin edilebilir (Beck, 1976).

Fakat her yerde jeotermal ısı haritaları mevcut değildir ve toprak altının değişik özellikleri (toprak altı su akıntıları, çatlaklar, süreksizlikler vb.) olabilmesi nedeniyle laboratuvar ölçümleri yeraltındaki gerçek değeri veremez ve bu nedenlerden dolayı da uygulama yapılacak yerde bu değerin testler yardımıyla tahmin edilmesi önemli ve gereklidir.

Isıl iletkenlik değeri, toprağa açılan kuyuya belli sabit bir değerde ısı basılmasına (veya çekilmesine) toprağın verdiği cevaba göre tespit edilebilir. Bu yöntemde *Lord Kelvin*'in, silindirik katı bir cisim ekseninden geçen sonsuz bir *çizgi boyunca sabit ısı verilmesi* durumunda silindir içerisinde radyal mesafe ve zamana bağlı olarak sıcaklık değişimini veren denklemi kullanılarak ısı iletkenlik değeri çekilebilir. (Thomson, 1884). Burada kuyu sonsuz bir çizgi gibi kabul edilir ve bu çizgiden sabit olarak ısı verildiği (veya çekildiği) göz önüne alınır.

Silindirik katı bir cisim içerisinde merkezden sonsuz bir çizgi boyunca sabit ısı akısı verilmesi durumunda radyal mesafe ve zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi aşağıdaki gibi verilir (Thomson, 1884):

$$T(r,t) - T_\infty = \frac{\dot{q}'}{4\pi k} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (1.8)$$

burada \dot{q}' birim uzunluktaki ısı yükü, k ısı iletkenlik katsayısı, α ısı yayılım katsayısıdır. E_1 ise üssel (eksponansiyel) integraldir ve aşağıda verilen basit ifade ile yaklaşım yapılabilir (Carslaw ve Jeager, 1959):

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (1.9)$$

$\gamma=0.5772$ Euler sabitidir. $\alpha t/r^2 > 20$ için maksimum hata %2.5, $\alpha t/r^2 > 5$ için %10 dur (Gehlin, 2002). Denklem (1.9)'u (1.8)'de kullanarak:

$$T(r, t) = T_\infty + \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - 0.5772 \right] \quad (1.10)$$

elde edilir. Kuyudaki boruda dolaşan akışkan ile kuyu çeperi arasında da bir direnç oluşmaktadır, bu değer de hesaba katılırsa;

$$T_a - T_\infty - \dot{q}' R_k = \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - 0.5772 \right] \quad (1.11)$$

burada T_a akışkan sıcaklığı, T_∞ ise toprağın doğal sıcaklığıdır. Burada k ve R_k değeri bilinmemektedir. Akışkan sıcaklığını serbest bırakır ve parantez içerisindeki doğal logaritmik ifadeyi ayırırsak:

$$T_a = \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} \left[\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - 0.5772 \right] + \dot{q}' R_k + T_\infty \quad (1.12)$$

elde ederiz. Tekrar düzenlersek;

$$T_a = \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} \ln(t) + \frac{\dot{q}'}{4\pi k_t} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - 0.5772 \right] + \dot{q}' R_k + T_\infty \quad (1.13)$$

$\ln(t)$ 'li ifadeyi yalnız bırakmış oluruz. Burada birinci ifadeden sonraki terimler zamanla değişmez, ilk ifadede $\ln(t)$ başındaki terimlere c dersek ;

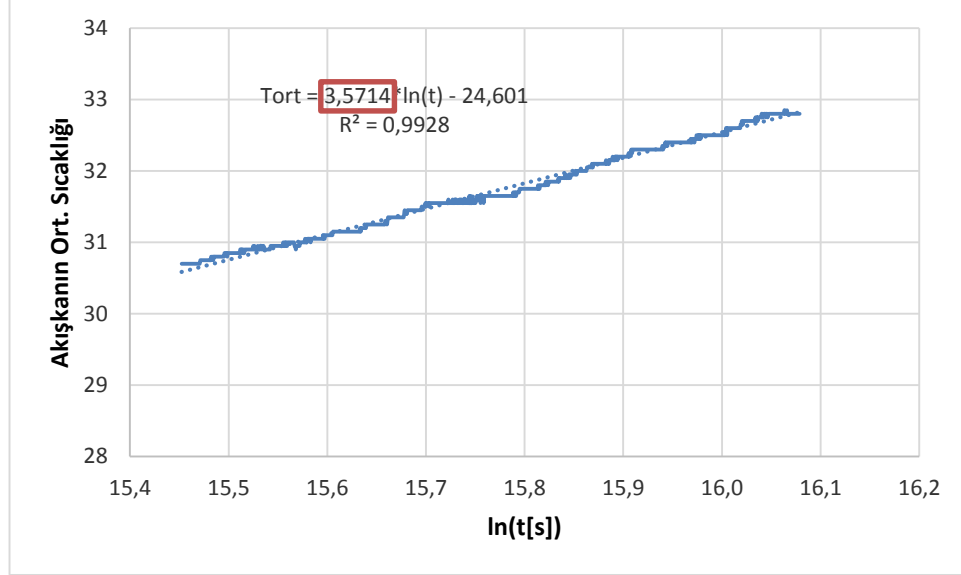
$$T_a = c \ln(t) + m \quad (1.14)$$

c değeri sıcaklık ortalamasının logaritmik zamandaki değişiminin eğim değeri kullanılarak bulunur, buradan da k_t terimi çekilir:

$$k_t = k_{eff} = \frac{\dot{q}'}{4\pi c} \quad (1.15)$$

burada c eğim değeridir. Buradan *etkin (efektif) ısıl iletkenlik* ve denklem (1.11) ile *kuyunun ısıl direnci* bulunur. Burada hacimsel ısı kapasitesi olarak da adlandırılan ρC_p

ifadesi tahmini olarak seçilir. ρC_p jeolojik yapı içerisinde %10-20'lik bir değişim oranına sahip olması (Banks, 2008) nedeniyle bu değişim sonuçlara çok fazla etki etmez. Örnek bir test ile elde edilen eğim Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8 : Örnek bir ısıl tepki testi ile elde edilen ort. akışkan sıcaklığının logaritmik zamandaki değişimi (c değeri = 3.57).

Bu yöntem kolay uygulanabilir olması nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. Kuyu içerisindeki dolgu, boru vb. ısı kapasiteleri hesaba katılmadığı için kuyunun kararlı hale geçmesi için belirli bir sürenin geçmesi gerekir. Bunun için test başlangıcından belirli bir süresi atılır. Eskilson'a (1987) göre bu süre $5r_k^2 / \alpha$ ile bulunabilir. Burada r_k kuyu çapını, α ısı yayılım katsayısını temsil etmektedir. Eskilson'a göre $5r_k^2 / \alpha$ süre sonra kuyu ve içerisindeki malzemeler ısı dengeye ulaşır ve topraktaki değişimler etki etmeye başlar. Bu sebeple çözümlenelerde $5r_k^2 / \alpha$ zamanından sonraki sonuçlar kullanılır.

Sonsuz çizgi kaynak metodu kuyuyu sonsuz uzunlukta kabul ettiği için toprakaltı kuyusunu tam olarak temsil edememektedir. Buna karşılık yarı üç boyutlu bir sonlu çizgi kaynak metoduna dayanan bir model de geliştirmiştir (Zeng vd., 2003).

Sabit ısı akısı ile testlerde diğer en çok kullanılan metot *silindirik kaynak* metodudur. Bu metotta kuyunun silindirik çeperinden sabit ısı akısına maruz bırakılması durumunda çevredeki sıcaklık dağılımları bulunabilir. Ingersoll (1954) çözümünü

kullanarak Kavanaugh ve Rafferty (1997) tarafından sıcaklığın radyal koordinat ve zamanla değişimi:

$$T(r,t) - T_{\infty} = \frac{\dot{q}'}{k} G(Fo, \tilde{r}), \quad \tilde{r} \geq 1 \quad (1.16)$$

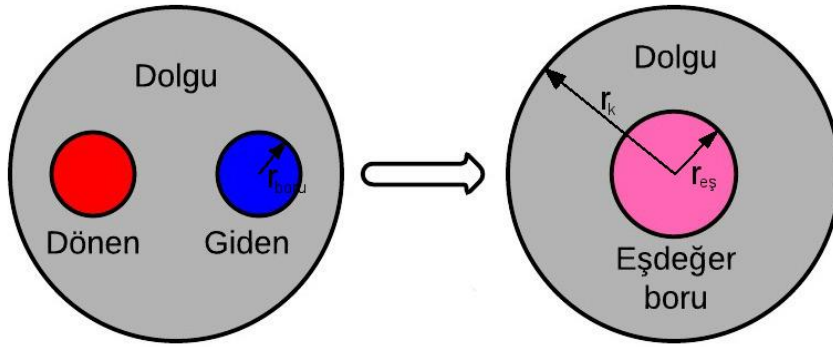
şeklinde verilmiştir. Burada:

$$Fo = \frac{\alpha t}{r^2}, \quad \tilde{r} = \frac{r}{r_{eş}}$$

ve G fonksiyonu ise

$$G(Fo, \tilde{r}) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \left(e^{-Fo\beta^2} - 1 \right) \frac{[J_0(\tilde{r}\beta)Y_1(\beta) - Y_0(\tilde{r}\beta)J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (1.17)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır. Burada analitik çözüm elde edebilmek için kuyu içerisindeki iki boru eşdeğer boru ile temsil edilmiştir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 : Eşdeğer boru yaklaşımı.

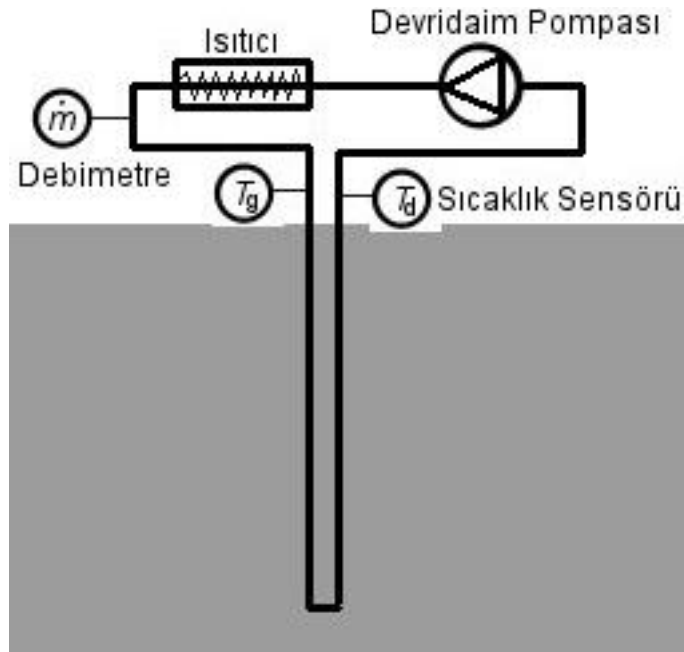
Çizgi kaynak ve silindirik kaynak yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar görülebilmektedir. Örnek olarak (Yu vd., 2013) iki modelin karşılaştırmasını yapmış ve silindirik kaynak metodunda %9-13 oranında daha yüksek ısı iletkenlik değerinin çıktığını göstermiştir. Gehlin'de (2002) çalışmasında silindirik kaynak ile daha yüksek değerler elde etmiştir. Son yıllarda yapılan diğer bir karşılaştırma (Philippe vd., 2009) iki metot arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir.

1.8.1 Sabit ısı akılı ısıl tepki testi (ITT) ile ilgili çalışmalar

Kuyu içerisine belirli bir süre sabit oranda ısı vererek toprağın verdiği cevaba göre ısıl iletkenlik ve kuyu direncinin bulunduğu işleme sabit ısı akılı *ısıl tepki testi*⁷ adı verilir. Son yıllarda oldukça geniş alanda Isıl Tepki Testleri (ITT) kullanılmaktadır. ITT ilk olarak teorik şekilde Choudary (1976) ve Mogensen (1983) tarafından önerilmiş 95-96'lı yıllarda ilk test cihazları birbirinden bağımsız olarak *İsveç Lulea Üniversitesi* ve *ABD Oklahoma Eyalet Üniversitesi* tarafından geliştirilmiştir. (Sanner vd., 2005)

Sabit ısı akılı ITT genelde kuyuya sabit ısı akısı verilerek gerçekleştirilir. Sabit ısı akısı elektrikli rezistanslarla veya herhangi bir ısı kaynağı ile sağlanabilir. Test cihazı temel olarak bir ısıtıcı, gidiş ve dönüş sıcaklıklarını ölçen iki adet sıcaklık sensöründen ve bir debi ölçerden oluşur (Şekil 1.10). Testler uzun sürdüğü için bir veri kayıt sistemi ile veriler kaydedilir.

Isıl tepki testinde sadece toprağın bir kısmı test edildiği için çıkan sonuç sadece o bölgedeki ısıl iletkenlik değerini vermektedir (Witte, 2013). Ayrıca kuyuda farklı özellikte toprak tabakaları olabileceği için elde edilen değer *etkin (efektif) değer* olacaktır.



Şekil 1.10 : Sabit ısı akılı ısıl tepki testinin temsili şekli.

⁷ Thermal Response Test

Kuyu içerisindeki boru üzerine sensörler yerleştirilerek her tabakadaki sonuçlar izlenmesi ile de ısıl tepki testleri yapılmıştır (Acuña, 2013). Bu yöntem geleneksel sistemlere göre daha maliyetli olmaktadır. Geleneksel yaklaşımla elde edilen efektif ısıl iletkenlik değeri kullanmanın farklı tabaka değerlerinden elde edilen değerleri kullanmaya göre hatası incelenmiş ve oldukça düşük olduğu bulunmuştur (Lee, 2011). Bu nedenle test sonucunda elde edilen efektif ısıl iletkenlik değeri esas alınarak modellemelerde toprağın homojen kabul edilmesi uygun kabul edilebilir.

1.8.2 Diğer kuyu modelleme çalışmaları

Düşey kuyu uygulamalarında açılan kuyu içerisine bir veya birden fazla U borusu yerleştirilir. Kuyunun simetrik olmayan yapısı nedeniyle analitik çözümler oldukça zor olmaktadır. Silindirik kaynak metoduna benzer şekilde eşdeğer çap ile çözüm yanında diğer yöntemler de denenmiştir. Kuyu içerisindeki ısıl direnç, elektriksel devre benzeşimi ile çözümlenmiş (De Carli, 2010) ve ısı kapasitelerini de içeren bir model geliştirilerek modelin kısa zamanlı çözümlerde de doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Analitik olarak diğer çözüm denemeleri ise *Laplace* ve *Gaver-Stehfest* yöntemi (Bandyopadhyay vd., 2008 ve Beier, 2014), ve kısa zamanlı çözümler içinde doğru sonuçlar veren bir model olan *Green* fonksiyonu yöntemidir (Man vd., 2010; Dehghan vd., 2015a).

Aynı zamanda birçok sayısal model de geliştirilmiştir (Yavuztürk, 1999; Signorelli vd., 2007; Ozudogru vd., 2014). Analitik model ile modelin fiziğini anlamak daha kolay olmakta ve mühendislik tasarım programlarına uygulaması daha kolay olmaktadır. Fakat sayısal modeller ise daha doğru sonuçlar vermekte ve kuyu altında farklı olaylar (su akıntısı, çatlaklar vb.) model içerisine eklenebilmektedir. Ayrıca sayısal model ile sistemin uzun süreli performansı da daha doğru olarak tahmin edilmektedir (Zanchini vd., 2012). Fakat tasarım süresi zaman alıcıdır. Sayısal modeller 1, 2 veya 3 boyutlu olabilir. En iyi sonuçlar 3 boyutlu modellerde elde edilmesine karşılık kuyuda derinlik-çap oranının oldukça büyük olması nedeniyle yüksek işlem kapasiteli bilgisayarlar ve çözüm için uzun zamanlar gerekmektedir. Fakat aksel simetri kullanılarak ve düşey katmanlara bölerek çözüme (Zarella vd., 2011) yöntemleri ile işlem hacmi azaltılabilmektedir.

Uygulamalarda sistemin fiziğini, davranışını anlamak ve sistem üzerinde bilimsel analizler yapılmak isteniyorsa analitik modellerin kullanılması fakat büyük toprak

kaynaklı ısı pompası projelerinde 3D veya çoklu 2D yani tabakaların birleşimi ile oluşturulan 3D benzeri sayısal modellerin kullanılması daha faydalı olduğu söylenebilir.

1.8.3 Düşey toprak ısı değiştiricileri üzerine yapılan çalışmalar

Kuyu ile toprak arasındaki ısı transferini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunların bazıları kuyularda kullanılan malzemelerin ısıl iletkenliğinin artırılmasına odaklanmış (Allan ve Kavanaugh, 1999, Allan ve Philippacopoulos, 2000; Allan 2000; Koyun vd., 2009; Erol ve François, 2014; Borinaga-Treviño vd., 2013) bazıları ise toprak ısı değiştiricilerinin performansı için farklı yapısal değişikliklerin etkisini incelemiştir (Zarella vd., 2013a; Zarella vd., 2013b; Zanchini vd., 2010; Congedo vd., 2012; Focaccia ve Tinti, 2013). Kapalı evrim toprak ısı değiştiricileri (U-boru vd.) geniş olarak 1970'lerden sonra kullanılmıştır. İlk ne zaman kullanıldığı bilinmemekle beraber bugünlerde birçok uygulamada ift U borusu kullanılmaktadır. Birçok alışma da ift U borusunun tek olandan daha verimli olduğunu göstermiştir. (Florides vd., 2013; Zeng vd., 2003) yaptıkları çalışmada ift U-borulu kuyuların tek U'lu kuyulardan daha iyi performans verdiğini göstermiş, aynı zamanda boruların paralel bağlanması kısa süreli çalışmalarda oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bir kuyunun birim derinlikteki ısı transferi değerini arttırmak için denenen diğer bir metot ise eř-eksenli⁸ boru uygulamasıdır (Zanchini vd., 2010; Wood vd., 2012; Acuña ve Palm, 2013; Jalaluddin ve Miyara, 2012; Beier vd., 2013). Bu metotta iki boru eř-eksenli olarak çalışır. Su dış borudan girer ve i borudan çıkar. Fakat Wood vd., (2012) eř-eksenli uygulamanın U-borusundan daha dūřuk performans verdiğini göstermiştir. Dięer taraftan Acuña ve Palm (2013) ise tam tersine eř-eksenli boru ile U-borusundan %100 daha iyi sonuç elde ettiklerini raporlamışlardır. Fakat Zanchini vd., (2010) eř-eksenli uygulamada çapların önemli olduğunu dış çap sabit tutulurken i çapı arttırmanın performansı arttıracağını göstermişlerdir. Choi vd., (2013) tarafından eř-eksenliye benzer olan çok borulu toprak ısı değiştiricisi denemişler ve %2-12 arası daha iyi Etkinlik Deęeri (COP) değeri elde etmişlerdir. Dięer bir çoklu boru denemesi, aynı zamanda *karmaşık eř-eksenli*⁹ olarak isimlendirdikleri uygulama Jalaluddin ve

⁸ co-axial

⁹ complex-co-axial

Miyara (2012) tarafından modellenmiştir. Bu tasarımda merkez borunun etrafında dört boru bulunmaktadır ve su dıştaki dört borudan girmekte merkez borudan çıkmakta ve tekli U-borusu ile karşılaştırıldığında daha iyi performans vermektedir.

İlk çoklu U-borusu uygulamaları temel kazıklarda (enerji kazığı) kullanılmıştır (Brandl, 2006; Park, H. vd., 2013; Bozis vd., 2011). Bozis vd., (2011) enerji kazıkları için bir çizgi-kaynak modeli geliştirmişler ve teorik olarak çapı sabit tutularak U-borusunun sayısını arttırmanın performansı arttıracağını göstermişlerdir. Park vd., (2013) ise W tipi ve üçlü U-borusunu bir temel kazık kuyusunda kullanmışlardır. 72 saatlik testler yapılmışlar kısa süreli kullanımlarda üç U-borulu kuyunun W tipinden daha iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır. Fakat yazılarında belirttikleri gibi daha uzun süreli kullanımlar için temel kazıktan daha uzun kuyular gerekmektedir. Diğer önemli çalışma Zarrella vd., (2013b) tarafından yapılmıştır. Helisel ve üç U-borulu tasarımları 12m derinliğindeki temel kazıklarda denemişler ve helisel borulu kuyunun üç U-borulu kuyudan %9 daha iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır.

Fakat temel kazık uygulamaları değişik özelliklere sahiptir. Kuyuları geleneksel kuyulardan daha geniş çapa sahiptir ve ısıtma kuyularına nazaran derin olmadıklarından dolayı mevsimsel hava sıcaklık değişimlerinden etkilenebilirler. Diğer taraftan helisel tip borunun derin kuyu uygulamalarında kullanılması oldukça zordur. Geniş çaplı kuyular daha iyi ısıtma performansına sahipken ekonomik açıdan dezavantajlıdır (Luo vd., 2013).

Kuyu derinliğinin etkisi

Derin kuyularda akışkan daha fazla zaman geçirdiği ve kuyudaki gidiş ve dönüş boruları arasındaki sıcaklık farkları arttığı için sıcak olanından soğuk olanına ısı geçişi olmakta yani ısıl kısa devre olmaktadır. Esen ve Inalli (2009) yaptıkları çalışmada derin kuyularda ısıl kısa devrelerin fazla olduğu ve birim borudan elde edilen ısı yükünün görece az olduğunu göstermiştir.

Akış debisinin etkisi

Acuña ve Palm. (2013) yaptıkları deneysel çalışmada hacimsel akış debisinin azaltılmasının borular arasındaki sıcaklık farkının artmasına ve ısıl kısa devrelerin artmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Fakat diğer yandan debinin artışı sıcaklık farklarının azalmasına ve bu durumda deneysel ölçümlerde sıcaklık sensörlerinin

belirsizliğinin sonuçlar üzerinde daha büyük bir belirsizliğe yol açmasına neden olmaktadır (Witte, 2013).

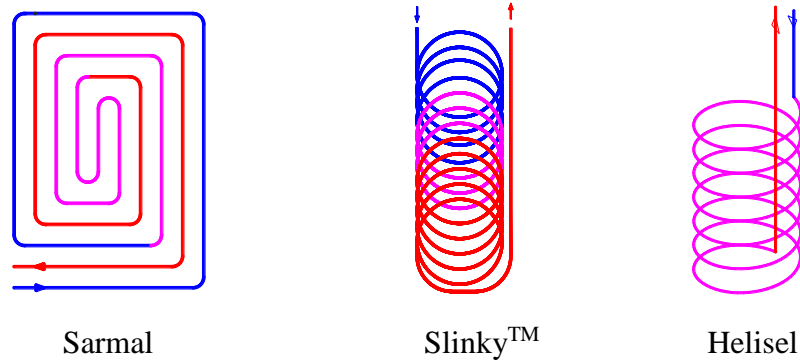
Kuyu ve boru çapının etkisi

Kuyu uygulamalarında genel olarak 32 mm veya 40 mm çapta boru kullanılmaktadır (Banks, 2008). Kullanılan kuyu çapı ise 100-200 mm arasında değişmektedir (Yang vd., 2010). Kuyu çaplarının etkisi üzerine çalışma yapılmasına rağmen (Luo vd., 2013) kuyu içerisinde kullanılan boru çapının etkisi ile ilgili olarak yapılan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

1.8.4 Yatay toprak ısı değiştiricileri üzerine yapılan çalışmalar

Yatay ısı değiştiricileri, derin olmayan (sığ) ısı değiştiricileri, serme tipi ısı değiştiricileri¹⁰ olarak da adlandırılmaktadır. Derin olmayan ısı değiştiricilerinin tercih nedeni, düşey sistemlere göre çok daha ucuz ve uygulama kolaylığının olmasıdır. Bu tip uygulamalarda borular çok derin olmayacak şekilde (sığ) toprak içerisine yerleştirilir. Bugüne kadar toprak altına yapılan sığ borulama tiplerini belli başlıklarda isimlendirebiliriz. Bunlar, başlıca düz (sarmal), slinkyTM ve helezonik/heliselden oluşmaktadır (Şekil 1.11).

Yatay/sığ ısı değiştiricilerinin ucuz ve kolay uygulanabilir olmasının yanında yerleştirme derinlikleri toprağın mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenen bölgesinde olduğundan performansı düşey sistemlerden daha düşüktür (Banks, 2008). Düşey ısı değiştiricili ısı pompalarının mevsimsel etkinlik katsayıları 4-5 civarında iken (Luo vd., 2015) yatay sığ ısı değiştiricili ısı pompası ile yapılan bir çalışmada (Wu vd., 2010) rapor edilen değer 2.5 olmuştur.



Şekil 1.11 : Yatay / sığ toprak ısı değiştirici tipleri.

¹⁰ İngilizce kaynaklarda genel kullanım: horizontal ground heat exchanger.

Borulamanın geometrisi ile ilgili de bazı çalışmalar yapılmıştır (Wu vd., 2010; Congedo vd., 2012). Sayısal çözümlemede birim kanal uzunluğu başına en iyi sonuç helisel boru tipinde elde edilmiştir (Congedo vd., 2012). Daha sonra slinky gelmiştir. Helisel borulamanın zor olması nedeniyle (bir dış destekleyici veya tutucular gerekmede) uygulamada daha çok slinky tipi ısı değiştiricileri kullanılmaktadır.

Slinky tipi borulamanın bilgisayar ortamında modellenmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Li vd., 2012; Wu vd., 2010; Fujii vd., 2012). Benzer bir çalışmada deneysel olarak da yapılmıştır (Fujii vd., 2013).

Slinky borulaması yatay uygulanabildiği gibi düşey olarak da uygulanabilir. Düşey uygulaması daha az alan kapsamakta birim alandan elde edilen ısı değeri oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca düşey olarak uygulamanın toprak altı su hareketlerinin etkisi nedeniyle daha iyi olacağı da gösterilmiştir (Li vd., 2012). Ayrıca slinky uygulaması tek katmanlı yapılabildiği gibi çift katmanlı da yapılabilmekte ve kısa süreli çalıştırmalarda oldukça iyi performans vermektedir (Fujii vd., 2013). Çift katmanlı çalışma durumunda en yüksek performansın akışkanı ilk önce üst katmana daha sonra alt katmana göndermekle elde edildiği de aynı çalışmada rapor edilmiştir.

Slinky uygulamasında performansı etkileyebilecek olası parametreler, slinky dairesinin kaydırma adımı, slinky çapı, gömme derinliği, toprak yapısının etkisi ve slinky ısı değiştiricileri arasındaki mesafe olarak sıralanabilir. Bu parametreler arasında slinky çapını arttırmanın bir etkisi olmadığı gösterilmiştir (Wu vd., 2010; Chong vd., 2013). Slinky kaydırma adımını azaltmanın birim alandan elde edilen ısı değerini arttırdığı belli bir değerden sonra boru maliyetinin elde edilen kazançtan daha fazla olduğu bildirilmiştir (Chong vd., 2013). Toprağın ısı özelliklerinin performansa oldukça büyük etkisi olduğu gösterilmiştir (Congedo vd., 2012; Fujii, vd., 2013). Toprağın yoğun yağış alan bir bölgede olması performansa olumlu etki ederken (Go vd., 2015) Simms vd., (2014) ise yaptığı çalışmada kendi ülkesindeki (Kanada) toprak yapılarını göz önüne alarak toprağın heterojen bir yapıda olmasının önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir.

Congedo vd., (2012) gömme derinliğinin etkisinin olmadığını bildirmiş fakat bu iddiası deneysel olarak desteklenmemiştir.

Öne çıkan çalışmalardan biri olan Park SK., vd. (2013) çalışması *coil* olarak isimlendirdiği helisel ısı değiştiricisi için *Green* fonksiyonları ile bir analitik model

geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Çizgi kaynak, silindirik kaynak ve Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) sonuçları da verilmiştir. Geliştirilen analitik model ve SEM deneysel sonuçlara oldukça yakın çıkarken, çizgi kaynak yaklaşımı daha düşük, silindirik kaynak daha yüksek sonuçlar vermiştir. Testler laboratuvar ortamında sabit ısı akısı ile yapılmıştır.

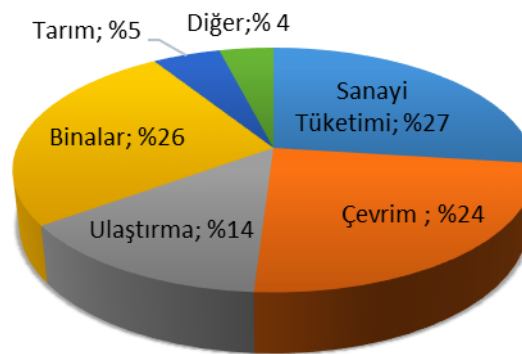
Diğer önemli bir çalışmada Fujii vd., (2012) tarafından slinky toprakaltı ısı değiştiricisinin modellenmesi için *Feflow* yazılımı ile yapılmıştır. Ayrıca güneşin, rüzgârın, kısa, uzun dalga ışınımını da içeren enerji denklemi uygulanmış ve 5 günlük testler yapılmıştır. Elde edilen sonuca göre enerji dengesi ile çözümlerde denklik sağlanırken, enerji dengesi eklenmediği durumda büyük fark ortaya çıktığı gösterilmiştir.

1.9 Türkiye'deki Durum

Şekil 1.12'de sunulan *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı* 2012 verilerine göre ülkemizdeki enerji tüketiminin %26'sı binalarda kullanılmaktadır.

Binalarda kullanılan, katı yakıt, doğalgaz ve petrol çok büyük oranda ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Daha önceki yıllardaki (2010 vb) verilere göre binalarda kullanılan enerjinin %70'inin ısıtma amaçlı kullanıldığı göz önüne alınırsa buradan ülkemizdeki toplam enerji tüketiminin %18.2'sinin yani yaklaşık beşte birinin binalarda ısıtma amacıyla kullanıldığını söylemek mümkündür. Buradan ısıtma teknolojileri üzerine yapılacak iyileştirmelerin ülke ekonomisine büyük kazançlar sağlayacağı açıkça görülmektedir.

2012 Toplam Enerji Tüketimi Dağılımı



Şekil 1.12 : Türkiye'nin 2012 yılı toplam enerji tüketimi dağılımı (Url-6).

Ülkemizde ısıtmada kullanılan doğalgaz, petrol vb. birincil enerji kaynaklarının çoğunluğunun ithal olduğu göz önüne alınırsa bu enerji kaynaklarında büyük oranlarda dışa bağımlı olmamız nedeniyle ülkenin enerji arz güvenliğinin bir risk taşıdığı söylenebilir. Bu nedenle ülke içerisinde yerel enerjinin çeşitlendirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve alternatif enerji kaynaklarının kullanılması bir gereklilik haline gelmiştir.

Ayrıca adaylık sürecinde bulunduğumuz *Avrupa Birliği* müktesebatı enerji faslına uyumluluk çerçevesi içerisinde yükümlülüklerimiz de bulunmaktadır. Avrupa Parlamentosu'nun 23 Nisan 2009 tarihinde 2009/28/EC numaralı "*Yenilenebilir Kaynaklı Enerji Kullanımının Arttırılması*" başlıklı, 20-20-20 olarak da bilinen direktifine göre 2020 yılına kadar ulaşım, ısıtma-soğutma ve elektrik tüketimi sektöründe sera gazı kullanımının 1990 yılına göre %20 azaltılması, enerji verimliliğinin %20 arttırılması ve kullanılan enerjinin %20'sinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması hedeflenmektedir. Bu program çerçevesinde yenilenebilir/alternatif enerji ve verimlilik çalışmalarının artarak devam etmesi gerekmektedir.

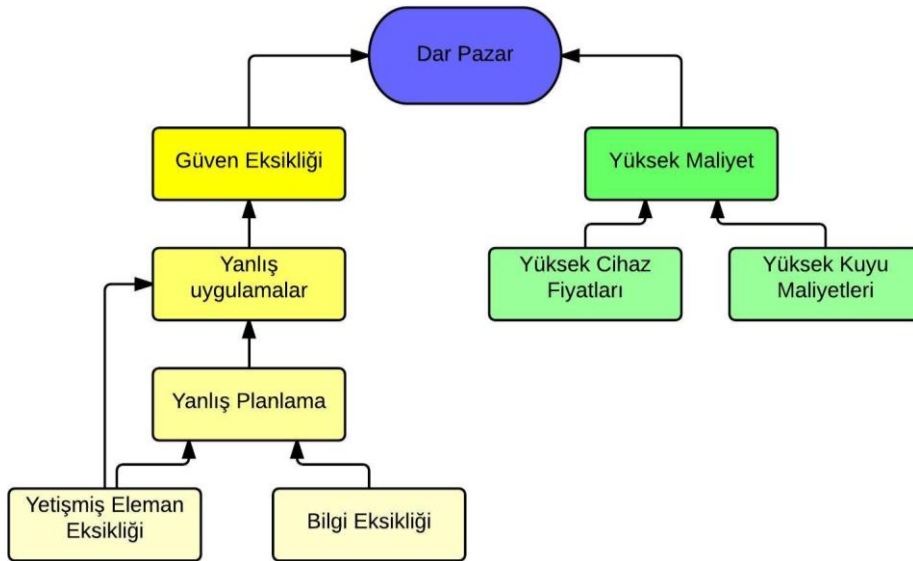
Türkiye'de literatüre geçen ilk toprak kaynaklı ısı pompası sistemi 1998 yılında İstanbul'da 276 m² lik bir villaya kurulmuştur. Daha sonra bir çok villa, AVM, işyeri vb. alanlarda kullanılmıştır. Belli başlı büyük uygulamalar şöyle sıralanabilir: *Ümraniye Meydan AVM*'de 900 kW toprak kaynaklı ısı pompası kullanılmış, toplamda 18327 m uzunlukta kuyu açılmıştır. Yine İstanbul'da 140 villa içeren bir sitede her bir villa için toprak kaynaklı ısı pompası kullanılmıştır. *Sabiha Gökçen* Havaalanında bakım servis binasında 20m uzunlukta 1584 adet enerji kazığı kullanılmış ve toplamda 1855 kW lık ısıtma sistemi kurulmuştur. 2014 yılı verilerine göre ülkemizde toplam kurulu toprak kaynaklı ısı pompası sistemi 42 MWt dir (Çetin ve Paksoy, 2015).

Çizelge 1.1'de gösterildiği gibi ısıtma da geleneksel sistemlere göre %40 daha ucuza ısıtma imkanı sunan toprak kaynaklı ısı pompaları ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve yetersiz bilgi nedeniyle yeterli sayıda uygulanmamaktadır. *Türkiye*'deki ısı pompası satışı yapan firma oldukça çok olmasına rağmen ülkemizde ciddi bir üretici olmadığı için hepsi ithal ürün sunabilmekte ve uygulayıcı firma sayısı da çok kısıtlı bulunmaktadır. Bunun yanı sıra doğru projelendirme için son derece kritik olan ısıl tepki testi yapan kuruluş da şu an sadece bir tanedir. Bu zamana kadar rapor edilen toplam ısıl tepki testi ise sadece 12 adettir (Çetin ve Paksoy, 2015).

Geleneksel sistemlerin yoğun kullanımı nedeniyle toprak kaynaklı ısı pompaları ülkemizde tam olarak bilinmemekte ve kullanımı diğerlerine göre oldukça düşük kalmaktadır. Bunun en önemli nedenleri ısı pompalarının ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere nazaran daha yüksek olması ve yanlış uygulamalar nedeniyle oluşan düşük performans deneyimleri sonucu oluşan güven eksikliğidir. Yaygınlaşmama nedenlerini maddeler halinde aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Eksik yöntem nedeniyle yanlış planlama,
- Yanlış planlama ve uygulamalar nedeniyle ortaya çıkan düşük performans ve buna bağlı güven eksikliği,
- Projelendirme ve uygulama için yetişmiş eleman azlığı ve bilgi yetersizliği,
- Cihazların yurtdışından ithal edilmesi nedeniyle diğer sistemlere nazaran yüksek cihaz fiyatları,
- Toprak altında boruların yerleştirilmesi vb. işler nedeniyle artan ilk yatırım maliyeti.

Bunu bir problem ağacı şeklinde Şekil 1.13'teki gibi gösterebiliriz.



Şekil 1.13 : Toprak kaynaklı ısı pompası piyasasının gelişimini engelleyen problemler.

1.10 Toprak Isı Değiştiricilerinin Optimizasyonu

Toprak kaynaklı ısı pompalarında en büyük maliyetlerden birisi toprak tarafı maliyetleridir. Daha sonra cihaz maliyetleri vb. gelmektedir. Toprak tarafı maliyetlerine önemli derecede etki eden iki etken bulunmaktadır:

- Ölçme ve modellemeye dayalı doğru planlama; sistemin verimliliği, güvenilirliği ve uzun süreli performans garantisini arttırmak açısından ve ayrıca gereğinden fazla ya da eksik bir ilk yatırım maliyeti olmaması açısından önemlidir.
- Toprakla yapılan ısı transferinin büyüklüğü; uygulama yapılacak bölgede toprak yapısı değiştirilemediğinden geometri, malzeme, uygulama parametrelerine bağlı olarak ısı transferinin iyileştirilmesi elde edilecek ısı transferinin artmasına ve maliyetlerin azaltılmasına yardımcı olur.

1.11 Tezin Amacı

Toprak kaynaklı ısı pompalarında toprak özelliklerinin hızlı ve doğru bir şekilde tespiti ve toprakla olan ısı transferinin iyileştirilmesi ve bu yolla sistem performansının ve ömrünün artırılmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları bu tez çalışmasının temel amacını oluşturmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için bu tezin kapsamını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- Toprak kaynaklı ısı pompalarında kullanılan düşey toprak ısı değiştiricileri için sabit sıcaklıklı akışkan uygulamasına dayanan hem analitik hem de daha detaylı bir sayısal model kurulması,
- Model sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılabilmesi ve sonuçlara etki edebilen çok sayıda parametrenin deneysel incelemesinin yapılabilmesi için ülkemizin tek, dünyanın ise sayılı toprak ısı değiştirici deneysel test alanını içeren bir açık hava laboratuvarı ve ölçüm sisteminin kurulması,
- Farklı tasarlanmış toprak ısı değiştiricilerinin performansına etki eden çok sayıda işletim ve tasarım parametrelerinin etkilerinin deneysel gözlemlerle incelenmesi,
- Deneysel sonuçlarla model sonuçları karşılaştırılarak sayısal modellerin kalibre edilmesi, doğrulanması ve ayrıca toprağın ısıl özelliklerini ölçmeyi sağlayan bir metot geliştirilmesi,
- Hem sayısal hem de analitik modellerle farklı toprak ısı değiştiricileri için uzun süreli performans öngörülerinin yapılması,

- Düşey toprak ısı değiştiricilerinde birim uzunluk başına ısı transferinin boru çapına, gidiş-dönüş boruları arasındaki mesafeye, borular arası dolgu malzemesine, U borusu sayısına, akışkan hızına, kuyu derinliği ve kuyular arası mesafeye etkilerinin incelenmesi,
- Yatay toprak ısı değiştiricilerinde de (sarmal, slinky ve helisel tip) performans ölçümleri ve düşey uygulamaların sonuçları ile karşılaştırılması,
- Toprak ısı değiştiricilerinin performansına etki eden tasarım parametrelerinin etki dereceleri araştırılarak kullanım koşullarına bağlı en uygun toprak ısı değiştiricisi tasarımlarının belirlenmesi.

1.12 Tez Çalışmasının Özgünlüğü

Tez çalışmasının birinci odak noktası ısıl tepki testleridir. Literatür incelemesinde de verildiği gibi ısıl tepki testleri sabit ısı akısı ile yapılmaktadır. Sabit sıcaklık ile ısıl tepki testi sadece bir grup (Wang vd. 2010) tarafından denenmiştir. Fakat kullandığı denklemler Eskilson'ın (1987) g-fonksiyonlarının modifikasyonlarıdır. Bu çalışmada sadece bir kuyuda test yapılmış, diğer testler, çalışmalar vb. için herhangi bir geliştirme yapılmamıştır. Bu tez çalışmasında ise sabit sıcaklık ile ısıl tepki testi sistemi farklı bir analitik model ile gerçekleştirilmiştir. Bu analitik modelin, deneysel ve sayısal çalışmalarla doğrulaması yapılmış, Enstitü açık hava laboratuvarında bulunan farklı 4 kuyuda denenmiştir. Bu testlerle daha kısa sürede istenen sonuçlara ulaşılabildiği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının ikinci odak noktası toprak içerisindeki ısı transferinin arttırılmasıdır. Bu yönde de düşey ısı değiştiricilerinde kullanılan U borusu sayısının etkisi, boru çaplarının, borular arası mesafenin, kuyu derinliğinin, akış hızının ve kuyular arası mesafenin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Diğer kuyu tiplerine nazaran daha küçük çaplı olan bir ısıtma kuyusunda 3 adet U borusu kullanımı ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiş, oldukça iyi sonuçlar elde edilmiş, tek U borusuna göre performansın ısıl tepki testinde %38, 16 haftalık kesintisiz çalışma durumunda ise %25 arttırılabileceği gösterilmiştir.

Diğer incelenen parametrelerin bazıları (KUDET, BAMET, BOÇET) literatürde sayısal olarak gösterilmiş fakat deneysel olarak kanıtlanması yapılmamış olan

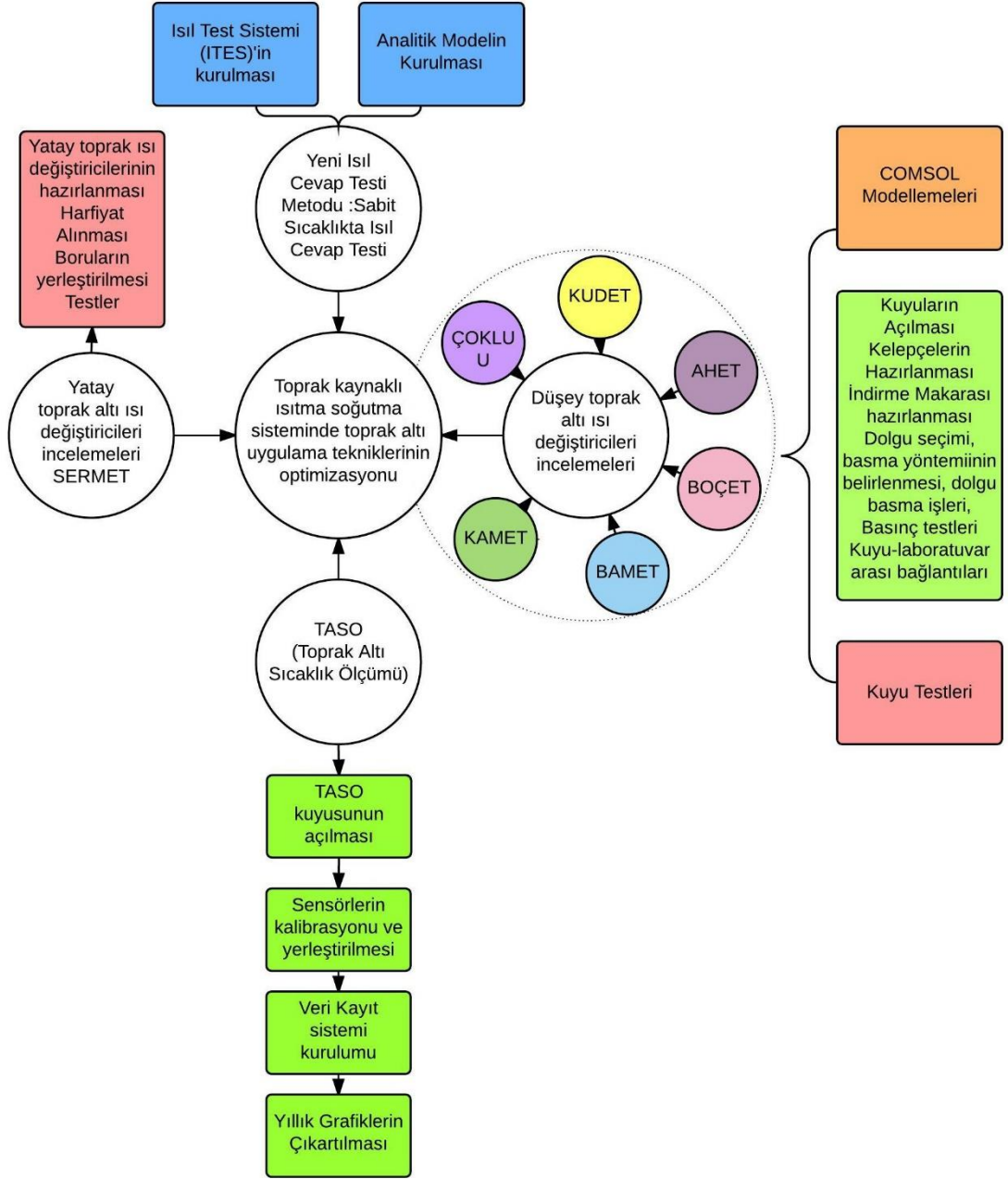
çalışmalardır. Bu incelemelerin de deneysel kanıtlanması yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır.

Yatay veya sığ toprak ısı değiştiricileri için inceleme yapılacak bölgenin 20m derinliğe kadar olan sıcaklık değişimleri 3 yıl boyunca izlenmiş, toprağın mevsimsel değişimlere bağlı farklı derinliklerdeki sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve en uygun gömme derinlikleri tespit edilmiştir. Farklı sığ uygulamalar arasında birim alan, birim uzunluk ve birim maliyet açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

Ayrıca farklı boru çapı, kuyu çapı, kuyu derinliği, U sayısı, borular arası mesafe, kuyular arası mesafeye sahip düşey ısı değiştiricileri; sarmal, düşey ve yatay slinky, düşey ve yatay helisten oluşan sığ ısı değiştiricileri; sabit ısı akısı ve sabit sıcaklıkta toprak ısı değiştiricilerinin test edilebildiği test sistemi ve ısı pompası cihazlarının test sistemini içeren, gelecek araştırmalara açık, açık hava ve kapalı araştırma alanlarına sahip, dünyada sayılı, *Türkiye*'de belki bu kapsamdaki ilk ve tek laboratuvar oluşturulmuş ve planlama, uygulama ve deneylerle elde edilen tecrübeler, yayınlar, tezler ile ülke literatürüne önemli bir bilgi birikimi kazandırılmaya çalışılmıştır.

1.13 Tez Çalışmasının Şematik Olarak Gösterilmesi

Tez'in temel hedefi ve bu hedefe yönelik olarak yapılan çalışmaların grafiksel özeti Şekil 1.14'te verilmiştir.



Şekil 1.14 : Tez çalışmasının grafiksel özeti.

2. DÜŞEY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ İÇİN DENEYSEL OLARAK DOĞRULANAN ANALİTİK BİR MODEL VE UZUN SÜRELİ PERFORMANS ÖNGÖRÜSÜ

Düşey toprak altı ısı değıştiricilerinin boyutlandırılmasında ısıl tepki testi ile elde edilen toprağın efektif ısıl iletkenliğı ve kuyunun ısıl direnci kullanılır. Bölüm 1’de detaylı bilgi verildiğı gibi genel olarak sabit ısı akısı ile ısıl tepki testi yapılmaktadır. Fakat bugüne kadar yapılan uygulamalarda bazı problemler tespit edilmiştir. Bu problemler ve bu çalışmada önerilen metot alt bölümlerde anlatılmıştır. Bu bölümde verilen çalışma, yazarın doktora tezi çerçevesinde yaptığı Aydın vd., (2013; 2014) çalışmalarının genişletilmiş bir anlatımını içermektedir.

2.1 Geleneksel Isıl Tepki Testindeki (ITT) Eksikler ve Önerilen Metot

Sabit ısı akılı testlerde en büyük problemlerden biri elektrik şebekesinden kaynaklanan voltaj dalgalanmalarıdır. Diğer bir problem elektrik kesintisi durumunda testin durması ve testin tekrar başlatılması için toprağın kendini yenilemesi nedeniyle belirli bir süre beklemenin gerekmesidir. Voltaj dalgalanmaları ve kesintiye uğramış testler için bazı çözümler (Beier, 2008; Hu vd., 2012; Kosukegava ve Fujii, 2015) önerilmiş olup bu konu üzerindeki çalışmalar devam etmektedir.

Sabit ısı verme yönteminin bir diğer dezavantajı ise test için uzun zaman gerektirmesidir (yaklaşık iki gün). Test süresi için genel kabul yaklaşık 48 saattir. (ASHRAE, 2011; Gehlin, 2002; Sanner vd., 2005). Bujok vd., (2014) çalışmasında test süresini azaltmak istemiştir. 24 saatlik test sonuçları ile 70 saatlik test sonuçları arasında %15'lere varan hatalar ortaya çıkmıştır ve kabul edilebilir aralıkta değildir.

Sabit ısı akılı ısıl tepki testinde diğer bir eksik taraf ise test süresi boyunca kuyu içerisine elektrik şebekesinden yüksek güç tüketerek sürekli ısı basılmasıdır. Son zamanlarda Raymond ve Lamarche (2014) daha düşük güçlerde çalışan bir ısıl tepki testini teorik olarak önermiştir. Diğer bir çalışmada Witte vd., (2002), test süresince daha az enerji tüketme potansiyeli olan ısı pompası ile yapılan testlerin, hem ısı basma hem ısı çekme için yapılabileceğini gidiş, dönüş suyu arasındaki sıcaklık farkının sabit

tutulmasıyla voltaj dalgalanmalarından etkilenmeyeceğini belirtmiştir. Ancak bu durumda bir ısı pompasının test alanına taşınması gereksinimi vardır.

Toprak kaynaklı bir ısı pompasının çalışması sırasında toprak tarafı, kompresör devreye girdiğinde çalışmakta ve toprağa sıcak akışkan (soğutma durumu için) veya soğuk akışkan (ısıtma durumu için) gönderilmektedir. Binanın ısı yüküne göre toprağa gönderilen akışkan miktarı değişmektedir. Bir projede gerekli kuyu uzunluğunu planlama işlemi binanın ısı yükü, kullanım süresi ve ısı pompasının sezonsal COP değeri hesaba katılır. Bu işlemde olabilecek en kötü durumu göz önüne almak doğru sonuçlar elde etmeyi garantiler. Bu nedenle toprak tarafı dolaşım pompasının sürekli çalıştığı ve kuyuya sürekli sıcak (veya soğuk) akışkan gönderildiği düşünülür. Olabilecek en kötü durumu simüle etmek için belirli bir zaman süresince kesintisiz bir şekilde sabit sıcaklıkta akışkan gönderilmesi göz önüne alınır.

Ayrıca ısı pompası standartlaştırılmasında¹¹ toprak ve yük tarafları için sabit sıcaklıklar kullanılmaktadır. Bu değerler topraktan dönüş sıcaklığı ve yük tarafına gidiş sıcaklığıdır. Kuyuyu, ısı pompası standartlaştırmasında olduğu gibi sabit sıcaklıkta test etmek daha sağlıklı bir yaklaşım olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada ısı pompasında olduğu gibi kuyunun da sabit sıcaklıkta test edilmesi önerisi geliştirilmiş ve benimsenmiştir. Sabit sıcaklıklı testte elektrik şebekesinden kaynaklanan voltaj dalgalanmalarının bozucu etkisi ortadan kalkacak, en önemlisi toprağın ısıl özellikleri daha kısa bir zamanda ve daha yüksek bir doğrulukla elde edilebilecek (Wang, 2010) ve gerçek ısı pompası çalışma koşullarına daha yakın koşullarda bir test gerçekleştirilmiş olacaktır.

Sabit sıcaklıklı ITT'nden elde edilecek sonuçlar hem analitik hem sayısal olarak analiz edilebilecektir. Uzun zamanlı performans öngörülere yapılabilecektir. Çünkü toprak kaynaklı ısı pompası planlamasında en önemli ölçütlerden biri sistemin verimli çalışma süresinin bilinmesidir. İyi planlamanın gereklerinden birisi de sistemin güvenilirliğini arttırmaktır. Sağlıklı ölçümlere dayalı uzun süreli performans öngörü başarısı yüksek bir model kullanılmadığı sürece kullanımın ileri zamanlarında kapasite yetersizlikleri meydana gelebilecektir.

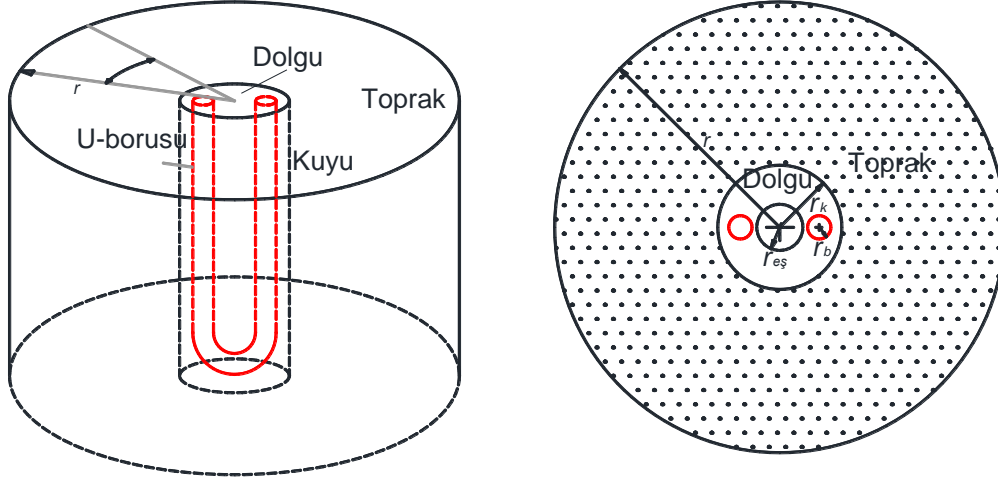
¹¹ Isı pompalarının karşılaştırılması için ortak değerler vardır. Isı pompasından elde edilen ısıl gücün harcanan güce oranı (COP) ısı pompasına giriş suyu sıcaklığı ve binaya gidiş suyu sıcaklığı göz önüne alınarak verilir. Örnek olarak B0/W35, W10/W50, A7/W40 gibi, burada birincisi kaynak tarafını ikincisi yük tarafını temsil etmektedir. B:Brine, toprakta dolaşan akışkan, W:Water,Su, A:air, hava.

Bu bölümde sabit sıcaklık testi için analitik bir model kurulmuş, sonuçların test sıcaklığına bağımlılığı incelenmiş ve farklı tipteki kuyularda testlerin deneysel sonuçları verilmiş, sayısal modelle doğrulanması ve bir kuyunun uzun zamanlı performans öngörüsü yapılmış ve farklı test süreleri için öngörüler incelenerek optimum test süresi önerilmiştir.

2.2 Tez Çerçevesinde Gerçekleştirilen Sabit Sıcaklıklı Isıl Tepki Testi İçin Analitik Modelin Kurulması

İçerisinde tek U borusu bulunan bir kuyunun şematik görüntüsü Şekil 2.1'de verilmiştir. Kuyu çeperi ile akışkan arasındaki ısı direnç, akışkanın, boru ve dolgunun ısı özelliklerine ve akışa bağlıdır. Dolgunun ısı kapasitesi toprağınki ile karşılaştırıldığında oldukça küçük olup ısı özellikleri (ısı iletkenliği) ise görece yüksektir. Bu nedenle belirli bir süre sonra dolgunun içerisindeki sıcaklığın zamanla değişimi ihmal edilebilecek hale gelir ve dolgu bölgesi pratik olarak kararlı hale geçer. Bu süre yaklaşık olarak ısının dolgu yarıçapının geçiş süresi ile ilgili zaman sabitinin 5 katı gibi kabul edilebilir ve daha önce Bölüm 1.8'de bahsedildiği gibi $5r_k^2/\alpha$ ile hesaplanabilir. Bu değer 17 cm çaplı ve α değeri $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olan kuyuda yaklaşık 10 saattir ($5 \times 0.085^2 / 1 \times 10^{-6} \approx 10 \text{ sa}$).

Test işlemi boyunca sabit ve yüksek sıcaklıktaki akışkan U-borusunun bir ucundan kuyuya gönderilir diğer ucundan görece daha düşük sıcaklıkta döner. Sıcaklık farkı akışkan debisine, test sıcaklığına, doğal toprak sıcaklığına ve toprağın ısı özelliklerine bağlıdır. Test başladıktan belirli bir zaman sonra sıcaklık farkındaki değişim çok yavaşlar ve akışkanın ortalama sıcaklığı sabit bir değere yakınsar. Kuyudan toprağa geçen ısının zamanla azalması çok yavaş olup bu azalma sonucu giden ve dönen akışkan sıcaklıkları birbirine daha da yaklaşacağından ve bu fark oldukça küçük olduğundan ortalama akışkan sıcaklığı neredeyse hep sabit kalır. Bu yaklaşım kullanılarak kuyunun etrafındaki sıcaklık dağılımı çıkartılabilir. Giriş ve çıkış boruları yerine eşdeğer bir boru düşünülmesi problemin çözümünü kolaylaştırır. Eşdeğer borudaki akışkan sıcaklığı akışkanın gidiş-dönüş ortalama sıcaklığı olacaktır. Bu durumda problem, eksenli sabit sıcaklıkta tutulan bir kuyunun etrafında zamana ve radyal uzaklığa bağlı olarak sıcaklık dağılımını arayan yaklaşık bir probleme indirgenmiş olacaktır.



Şekil 2.1 : Bir kuyunun perspektif görüntüsü ve kesiti.

Eşdeğer çap hesaplaması ile ilgili birçok öneri de bulunulmuş (Bose ve Smith, 1992; Kavanaugh ve Rafferty, 1997; Hellstrom, 1991; Sharqawy vd., 2009) fakat bu çalışmada diğer modellerle karşılaştırmada en iyi sonucu veren (Lamarche vd., 2010) multipole metodu (Bennet, 1987) kullanılmıştır¹². Bu yaklaşımda eşdeğer çap şöyle bulunur (Shirazi, 2013):

$$r_{eş} = r_b e^{-2\pi k_{dl} R_k} \quad (2.1)$$

Burada R_k kuyu direncidir:

$$R_k = \frac{1}{4\pi k_{dl}} \left[\ln \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2^{1+4\sigma}}{2(\lambda_2^4 - 1)^\sigma} \right) - \frac{\lambda_3^2 (1 - (4\sigma / (\lambda_2^4 - 1)))^2}{1 + \lambda_3^2 (1 + (16\sigma / (\lambda_2^2 - 1 / \lambda_2^2)^2))} \right] + \frac{1}{2} R_b \quad (2.2)$$

burada $\lambda_1 = \frac{r_k}{r_b}$, $\lambda_2 = \frac{r_k}{x_c}$, $\lambda_3 = \frac{r_b}{2x_c}$, $\sigma = \frac{k_{dl} - k_t}{k_{dl} + k_t}$ ve $R_b = \frac{\ln(r_{b,d} / r_{b,i})}{2\pi k_b}$ ile bulunur.

Buradaki formüller dolgu ve toprağın ısı iletkenliklerini içermektedir. Dolgu iletkenliği ASTM D5334¹³ (2014) metodu ile laboratuvar ölçümü yoluyla bilinebilir. Bu tez çalışmasında dolgunun ısı iletkenliğinin tespit edilmesinde ASTM D5334 metodu ve *Comsol* programı, toprağın ısı iletkenliğinin tespit edilmesinde ise eşdeğer çap ile yinelemeli bir yaklaşım kullanılmıştır. Eşdeğer çap formülleri içerisinde toprak ısı iletkenliği vardır. Buna girilen ön bir değer ile eşdeğer çap bulunur, bu çap değeri kullanılarak deneysel verilerle örtüştürülen kuyunun birim uzunluğu başına ısı

¹² Burada kullanılan $r_{eş}$ metodu tek U için geçerlidir.

¹³ Kaya vb. maddeler için uygulanan ısı iletkenlik tespit etme metodudur.

transferinin zamansal değişim ifadesinden bulunan toprağın ısı iletkenlik değeri başlangıçta eşdeğer çapı hesaplar ken kullanılan değerle karşılaştırılır ve fark küçülünceye kadar tekrarlanan bu sürece devam edilir.

Toprağın ısı iletkenlik değeri Denklem 2.1'de doğrudan çarpan olarak girmediği için etkisi çok büyük değildir. Genel olarak bulunabilecek toprak ısı iletkenliğinin değiştiği 1-4 W/mK 'lik aralıkta buradaki kořullarda¹⁴ $r_{eş}$ ancak % 4.7 değişmektedir. Dolayısıyla yinelemeli yöntem için oldukça uygundur.

Geleneksel yöntemde olduğu gibi (Gehlin, 2002) taşınım ile ısı geçişi ihmal edilmiş, toprağın homojen olduğu ve topraktaki sıcaklığın düşey ve açısız olarak değişmediği kabul edilmiştir. Bu kabulde kuyunun etrafındaki sıcaklık dağılımını bulmak için silindirik koordinatlarda zamana bağlı bir boyutlu ısı transfer denkleminin çözümlenmesi gerekmektedir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Burada α toprağın ısı yayılım katsayısı ($\alpha = k_t / \rho c_p$) k_t ve ρ ise toprağın ısı iletim katsayısı ve yoğunluğudur. $\bar{T} = (T_g + T_d) / 2$ ortalama akışkan sıcaklığı olmak üzere problemin başlangıç ve sınır koşulları:

$$T(r_{eş}, t) = \bar{T} \quad (2.4a)$$

$$T(r, 0) = T_\infty \quad (2.4b)$$

$$T(\infty, t) = T_\infty \quad (2.4c)$$

Denklem (2.3) aşağıdaki ifadeler kullanılarak boyutsuzlaştırılır:

$$\theta = \frac{T - \bar{T}}{T_\infty - \bar{T}}; \quad (2.5a)$$

$$\tilde{r} = \frac{r}{r_{eş}}; \quad (2.5b)$$

¹⁴ $k_{dl}=1.7$ W/mK, $k_b=0.38$ W/mK, $x_c=0.0485$ m, $r_b=0.016$ m, $r_k=0.085$ m

$$\tilde{t} = \frac{\alpha t}{r_{e\varnothing}^2} \quad (2.5c)$$

Böylece

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{r}^2} + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} = \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{t}} \quad (2.6)$$

elde edilir. Boyutsuz başlangıç ve sınır koşulları ise aşağıdaki gibi olur;

$$\theta(1, \tilde{t}) = 0 \quad (2.7a)$$

$$\theta(\tilde{r}, 0) = 1 \quad (2.7b)$$

$$\theta(\infty, \tilde{t}) = 1 \quad (2.7c)$$

(2.6) denklemi (2.7a) başlangıç ve sınır koşulları ile çözüldüğünde aşağıdaki ifade elde edilir (Özışık, 1993):

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{\beta e^{-\beta^2 \tilde{t}} [J_0(\beta \tilde{r}) Y_0(\beta) - Y_0(\beta \tilde{r}) J_0(\beta)]}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} d\beta. \quad (2.8)$$

$$\int_{r'=1}^{\infty} r' [J_0(\beta r') Y_0(\beta) - Y_0(\beta r') J_0(\beta)] dr'$$

Denklem (2.8)'deki ifadenin ikinci integrali $-1/\beta^2$ olarak bulunur ve aşağıdaki şekilde daha basit bir biçime getirilir:

$$\theta(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{-2}{\pi} \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 \tilde{t}} [J_0(\beta \tilde{r}) Y_0(\beta) - Y_0(\beta \tilde{r}) J_0(\beta)]}{\beta (J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta))} d\beta \quad (2.9)$$

Burada bulunan ifade eşdeğer borunun etrafındaki zamana ve radyal koordinata bağlı olarak sıcaklık dağılımını vermektedir. Birim ısı transferi ise aşağıdaki şekilde bulunabilir.

Birim kuyu uzunluğu başına ısı transferi

Birim uzunluk başına ısı transferi ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{q}' = -2\pi k_t r_{e\bar{s}} \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{e\bar{s}}} \quad (2.10)$$

Boyutsuz ifadeler kullanılırsa:

$$\dot{q}' = -2\pi k_t (T_\infty - \bar{T}) \left. \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} \quad (2.11)$$

Boyutsuz sıcaklık değişim ölçüsünü (gradyenini) yalnız bırakmak için boyutsuz ısı transferi ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\tilde{q}' = \frac{\dot{q}'}{2\pi k_t (\bar{T} - T_\infty)} = \left. \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} \quad (2.12)$$

Denklem (2.9) ve (2.12) kullanılarak birim uzunluktaki ısı transferinin boyutsuz ifadesi aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\tilde{q}' = \left. \frac{d\theta}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} = \frac{2}{\pi} \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 \tilde{r}} [Y_0(\beta)J_1(\beta) - J_0(\beta)Y_1(\beta)]}{[J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)]} d\beta \quad (2.13)$$

Bu ifadedeki integral analitik olarak çözülememektedir. Ancak onun yerine sayısal olarak her boyutsuz \tilde{r} zamanı için birim ısı transferi değeri hesaplanabilmektedir. Deneysel ölçüme dayalı birim uzunluktaki ısı transferi (\dot{q}') sonuçları ise aşağıdaki şekilde basitçe hesaplanır:

$$\dot{q}'_{den} = \dot{m} C_p (T_g - T_d) / H \quad (2.14)$$

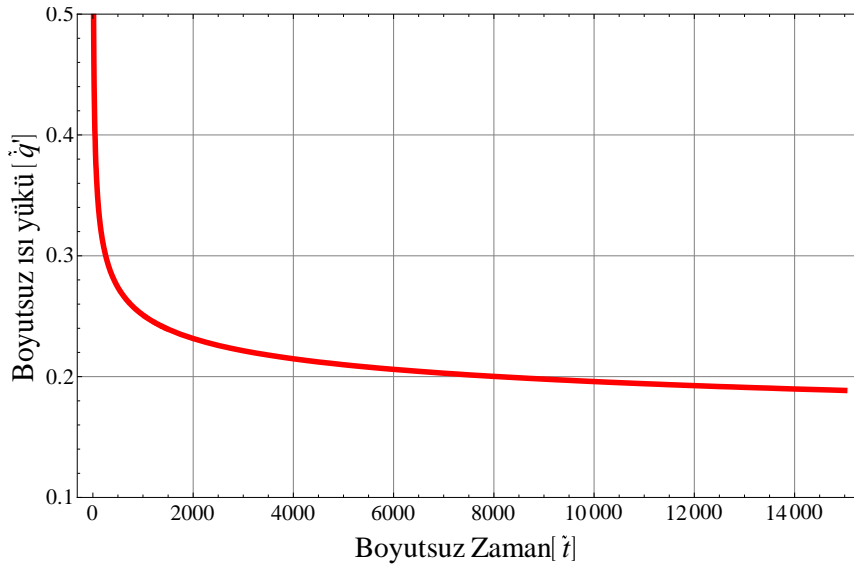
Burada \dot{m} akışkanının kütleli debisi, c_p akışkanın (su veya antifriz + su) sabit basınçtaki ısı kapasitesi, T_g kuyuya giriş sıcaklığı, T_d ise kuyudan dönüş sıcaklığı H ise kuyu derinliğidir. Buradan denklem (2.11)'in denklem (2.14) ile aynı sonuçları vermesi için k değeri değiştirilerek sonuçlarının örtüştürülmesinin sağlanmasıyla test sonuçlarına karşılık gelen toprak ısı iletkenliği ve ısı yayılım katsayısı bulunabilir. Bu denkleştirme işlemi denklem (2.15) ile ifade edilmiştir. Bu eşitlikte sol taraf denklem (2.11)'den elde edilirken sağ taraf deneysel verilerden (denklem (2.14) hesaplanmaktadır.

$$\tilde{q}'\left(\frac{t\alpha}{r_{e\varphi}^2}\right) = \frac{\dot{q}'_{den}(t)}{2\pi k_t(\bar{T} - T_\infty)} \quad (2.15)$$

(2.13) ifadesi, görüldüğü gibi salınımlı bir özelliğe sahip olan *Bessel* fonksiyonları içermektedir. Bu nedenle (2.15) ifadesi ile temsil edilen eşleştirme tekrarlamalarında¹⁵ sayısal integrasyon işlemi uzun sürmektedir. Denklem (2.13)'ün çözümünü daha hızlı ve çabuk yapmak için yeterli doğrulukta yakın sonuçları veren *temsili bir ifade* kullanılabilir. Bu temsili ifade kullanılarak *k* elde edilebilir, daha sonra (2.13) ile doğrulaması yapılabilir. Daha sonra aynı denklem uzun zamanlı öngörüler yapmak için kullanılabilir. Burada kullanılacak temsili ifade sadece çözümü hızlandırmak için kullanılan bir fonksiyon olacaktır.

2.3 Birim Isı Transferi İçin Temsili Bir İfadenin Bulunması

Bir kuyu için \tilde{q}' değerinin \tilde{t} 'nin 0 ile 15000 değer aralığındaki değişimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu değer aralığı, deneylerin yapıldığı arazinin toprak özelliklerinde $r_{e\varphi}^2/\alpha \approx 0.2$ sa olduğundan yaklaşık 0 ile 3000 saat aralığına karşılık gelmektedir.



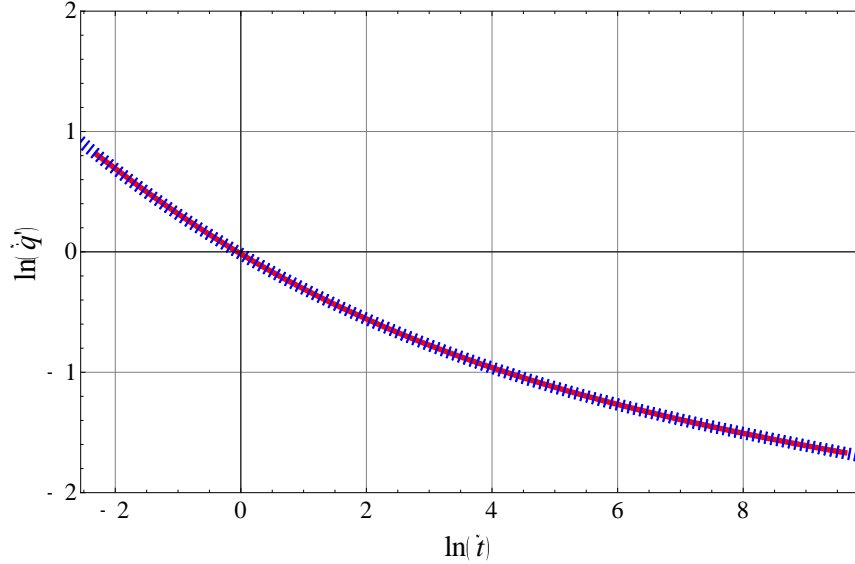
Şekil 2.2 : Boyutsuz zamana göre boyutsuz birim ısı transferinin değişimi.

Logaritmik koordinatlarda bu grafik Şekil 2.3'teki kırmızı eğride (sürekli çizgi) verildiği gibi olur:

¹⁵ iterasyonlarında

Kübik bir polinom fonksiyonu Şekil 2.3'te verilen eğriye örtüştürülürse¹⁶ \tilde{q}' için eşdeğer temsili ifade aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\ln(\tilde{q}'_{e\check{s}}) = -0.00069 \ln^3(\tilde{t}) + 0.02085 \ln^2(\tilde{t}) - 0.30864 \ln(\tilde{t}) - 0.0174 \quad (2.16)$$



Şekil 2.3 : $\ln(\tilde{q}')-\ln(\tilde{t})$ grafiği, Şekil 2.2'nin logaritmik koordinatlarda gösterimi.

Bu ifade gerçek ifade ile karşılaştırılırsa Şekil 2.3'te ki gibi bir sonuç elde edilir. Boyutsuz birim ısı transfer değeri, \tilde{t} açık terimleri ile şu şekilde yazılabilir:

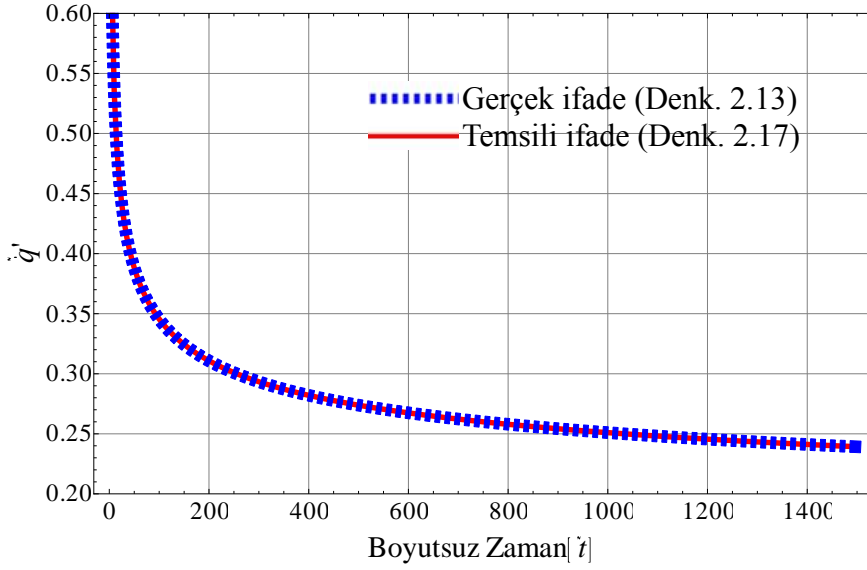
$$\tilde{q}'_{e\check{s}} = \frac{0.9827 \text{Exp}([0.02085 - 0.00069 \ln(\alpha t / r_{e\check{s}}^2)] \ln(\alpha t / r_{e\check{s}}^2))}{(\alpha t / r_{e\check{s}}^2)^{0.3086}} \quad (2.17)$$

(2.13) ve (2.17)'nin karşılaştırması Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi temsili fonksiyon denklem (2.17) (kesikli çizgili) mükemmel bir şekilde gerçek ifadeyi denklem (2.13)'ü temsil etmektedir. Bu nedenle temsili ifade (2.17), Denklem (2.13)'ün yerine örtüştürme işlemlerinde kullanılabilir. Gerçek ve temsili ifade arasındaki standart sapma şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sigma = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (\tilde{q}'_{Denklem.2.13)i} - \tilde{q}'_{Denklem.2.17)i})^2} \quad (2.18)$$

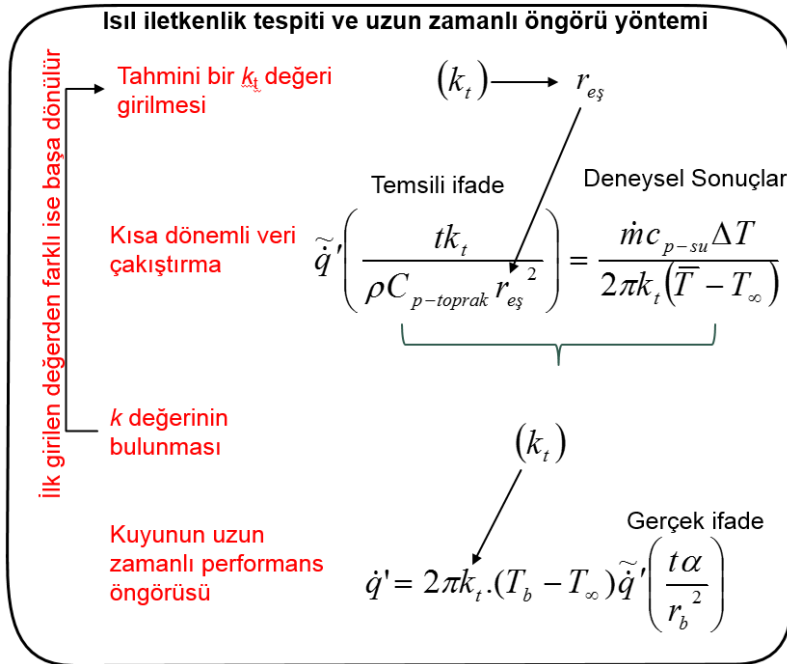
ve $\sigma=2.7 \times 10^{-4}$ ve $\text{MAPE}=3.9 \times 10^{-5}$ olarak bulunur.

¹⁶ fitting



Şekil 2.4 : Denklem (2.13) ve (2.17)'in sonuçlarının karşılaştırılması.

Böylece denklem (2.17), denklem (2.13) yerine deneysel verilerle örtüştürme işleminde toprağın ısı iletkenliğini bulmak için kullanılabilir. Daha sonra elde edilen ısı iletkenlik değeri gerçek ifade olan denklem (2.13) içerisinde uzun zamanlı kuyu performans öngörüsü için kullanılır. Örtüştürme ve öngörü işlemleri Şekil 2.5'te sembolik olarak gösterilmiştir. Bu örtüştürme işleminde α ve k_{eff} değerleri programa olabilecek limitleri verilerek elde edilebilir veya α değerinin değişiminin %10-20 oranında değişebileceği kabulüne (Banks, 2008) dayanarak tahmini bir değer girilerek k_{eff} değeri elde edilebilir.



Şekil 2.5 : Çakıştırma ve uzun süreli performans öngörüsü işlemlerinin gösterimi.

Ayrıca not edilmelidir ki \tilde{t} 'nin 15000'den büyük olmasına ihtiyaç duyulması halinde farklı temsili ifadeler aynı metotla üretilebilir. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan en uzun boyutsuz zaman değeri 15000 olduğu için (2.17) temsili ifadesi kullanılmıştır.

2.4 Isıl Tepki Test (ITT) Sistemi

Sabit sıcaklıklı ITT; daha hassas sonuçlar veren kararlı hale kısa geçiş ve geniş test sıcaklık aralığına sahip olması gibi bazı önemli avantajlara (Wang vd., 2010) sahiptir. Bununla birlikte sıcaklık kontrol gereklilikleri nedeniyle test sisteminin kurulumu görece daha maliyetlidir. Burada önerilen sabit sıcaklıklı test sistemi su tankına bağlı rezistanslar, dolaşım pompası, PID kontrol ünitesi ve bilgisayarlı veri toplayıcıdan oluşmaktadır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 test sisteminin sırasıyla şematik ve görsel gösterimlerini içermektedir. Bu sistemle her U-borusu ayrı olarak test edilebildiği gibi birden fazla kuyu beraber de test edilebilmektedir. Test sisteminde akış debisi ve giriş çıkış sıcaklıkları debimetre ve Pt1000 sıcaklık sensörleri ile ölçülür ve gerçek zamanlı olarak ekranda gösterilerek kaydedilir. Sıcaklık sensörleri ve debimetrenin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Test sistemi kurulmadan önce sıcaklık sensörleri kalorimetrik bir kap içerisinde 2 ve 55 °C sıcaklıkları arasında her sensör aynı sıcaklığı verecek şekilde kalibre edilmiştir. Debimetreler aynı zamanda *Siemens Mag5000* debimetresi referans alınarak kalibre edilmiştir.

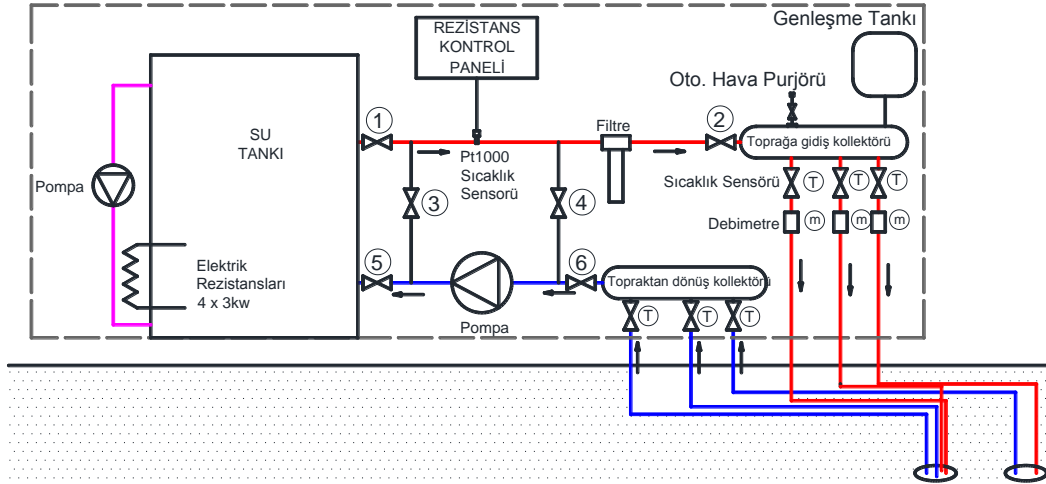
Çizelge 2.1: Debimetre ve sıcaklık sensörlerinin özellikleri.

Debimetre		
Ölçüm Aralığı	0.6 - 6	m ³ /sa
Nominal Çap	15	mm
Belirsizlik	±0.2	%
Doğruluk (Standart)	1	%
Sıcaklık Sensörü		
Tip	Pt1000	
Ölçüm Aralığı	-50...+230	°C
Belirsizlik	±0.15	K

Kuyuların ısı yükü değerlerini ölçmek için boruların uçları test sistemine bağlanır. Hava sistemden atıldıktan sonra ve test başlamadan önce toprağın doğal sıcaklığı ölçülmelidir. *Doğal toprak sıcaklığı*¹⁷ pompa çalıştırıldıktan sonra dönüş suyu sıcaklığının ölçülmesiyle gerçekleştirilen Ashrae (2011) metoduyla elde edilebileceği gibi Gehlin (2002) tarafından önerilen metotla da ölçülebilir. Gehlin metodunda 1, 4

¹⁷ Undisturbed ground temperature

ve 5 vanaları kapatılır (Şekil 2.6), pompa çalıştırılır devridaim eden su 15-20 dakika sonra doğal toprak sıcaklığı hakkında bilgi verir. Sonra 1, 4 ve 5 vanaları açılır, 2, 3 ve 6 vanaları kapatılır, mini pompa ve PID kontrollü elektrik rezistansları tank içerisindeki suyu istenen test sıcaklığına çıkartmak için çalıştırılır.



Şekil 2.6 : Sabit sıcaklıkta test yapabilen ısıl tepki test sistemi tesisat şeması.



Şekil 2.7 : Isıl tepki test sistemi görüntüsü.

Tank test sıcaklığına ulaştığında 3 ve 4 numaralı vanalar kapatılır, diğerleri açılır ve test başlatılır. Sol taraftaki mini pompa tank sıcaklığının tank içinde her yerde homojen olmasını sağlar. Akışkan gidiş sıcaklığı PID kontrol tarafından ölçülür ve kontrol edilir. Rezistans kontrol panelinin üzerinden test sıcaklığını kontrol etmek için kullanılacak rezistansın büyüklüğü (3, 6, 9, 12, 15, 18kW) ayarlanabilmektedir. Bu özellik sayesinde test sıcaklığı çok yüksek değerlere ayarlandığında ayarlanan rezistanslar sürekli çalışmakta ve akışkana sabit ısı akısı verilmektedir. Bu şekilde sabit ısı akısı ile de test yapılabilmektedir.

2.5 Deneysel Sonuçlar

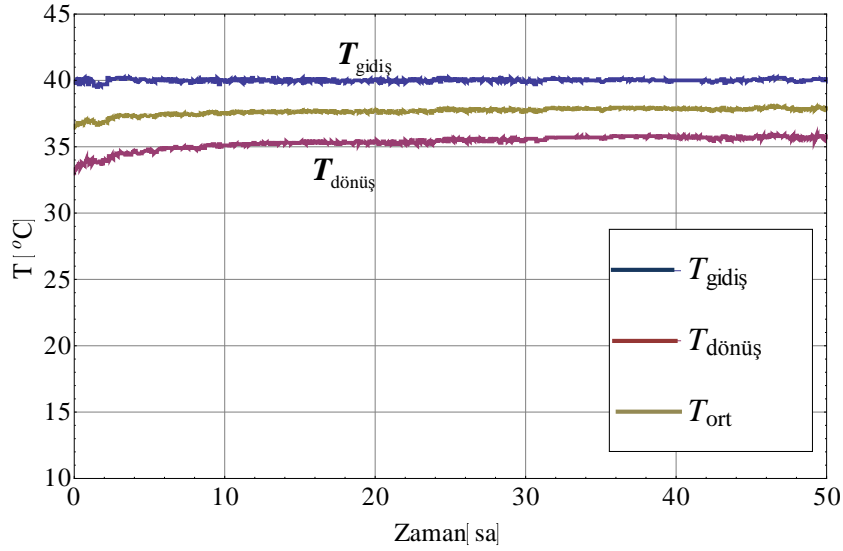
Modelin doğrulanması amacıyla yapılan testler, tek U borulu fakat bazı farklı özellikler içeren (Çizelge B.1) dört ayrı kuyuda gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kuyuların özellikleri ve test koşulları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Kuyu 2’nin testi 28 Mayıs-7 Haziran arasında diğer tüm kuyu testleri 10-20 Aralık 2014 tarihi arasında gerçekleştirilmiştir.

Kuyu 1 için test sırasında sıcaklıkların ve birim ısı transferi değerlerinin değişimi Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da sırasıyla verilmiştir.

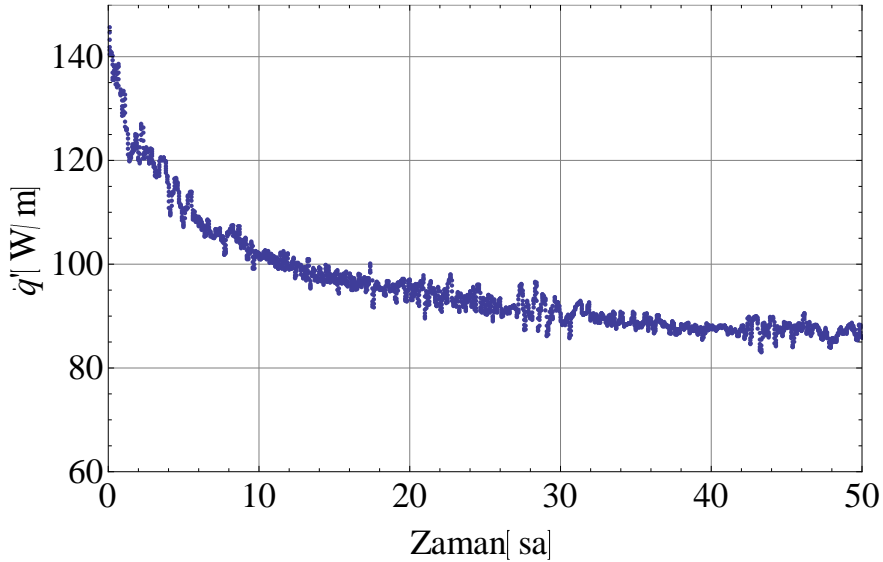
Çizelge 2.2 : İncelemede kullanılan kuyuların özellikleri ve test koşulları.

Kuyu kodu		K1	K2	K4	K5
Kuyu çapı	m	0.17	0.17	0.17	0.20
Kuyu derinliği	m	50	46	100	50
PE boru dış çapı	mm	32.0	32.0	32.0	40.0
PE boru iç çapı	mm	26.2	26.2	26.2	32.6
Dolgunun ısı iletkenliği	W/(mK)	1.7	1.7	1.7	1.9
Delme tarihi		2011	2011	2011	2012
Borular arası açıklık	mm	65	65	65	65
Test süresi	saat	50	236	50	50
Toprağa gidiş sıcaklığı	°C	40.0	40.0	40.0	40.0
Topraktan ort. dönüş sıcaklığı	°C	35.4	37.6	32.0	34.8
Akış debisi	ℓ/dk	16.0	25.4	16.0	15.9
Doğal toprak sıcaklığı	°C	16.0	16.0	16.5	16.1
ρ (37.5°)	kg/m ³	993	993	993	993
c_{p-su} (37.5°)	J/(kgK)	4179	4179	4179	4179

Şekil 2.8’den görüldüğü gibi gidiş suyu sıcaklığı test süresince sabit olmakta, ortalama sıcaklıktaki değişimler ise belli bir zamanda sonra çok azalmakta ve sabit bir değere yakınsamaktadır.



Şekil 2.8 : Kuyu 1'de test süresince gidiş, dönüş ve ortalama sıcaklıkların değişimi.



Şekil 2.9 : Kuyu 1'in birim ısı transfer değerinin test süresince değişimi.

Beton dolgu içerisinde ısı yayılım zamanının yaklaşık 4~5 katı süre içerisinde ısı transferi asıl olarak akışkan ile beton dolgu kütlesi arasındadır ve ancak pratik olarak bu süreden sonra toprakla ısı alışverişi önem kazanır ve ölçümler üzerinde belirleyici olur. Bu süre 1, 2 ve 4 numaralı kuyular için 9 saat iken Kuyu 5 için 12 saattir. Bu sebeple hesaplama işlemlerinde 12 saatten sonraki veriler kullanılmıştır Toprak için ρ değeri sahadan farklı toprak örnekleri alınarak ölçülmüş, c_p değeri ise sondaj sırasında gözlemlenen toprak yapısına bağlı olarak katalog değeri alınmıştır (Banks, 2012). (Çizelge 2.4). Denklem (2.17), Şekil 2.9'da verilen test sonuçlarına örtüştürülerek toprağın ısı iletkenlik değeri elde edilmiştir. Bu örtüştürme sonrası bulunan ısı

iletkenlik değeri kullanılarak Denklem (2.17) ile elde edilmiş eğriler ile test sonuçları Şekil 2.10'da karşılaştırılmıştır.

2.5.1 Test sıcaklığının etkisi

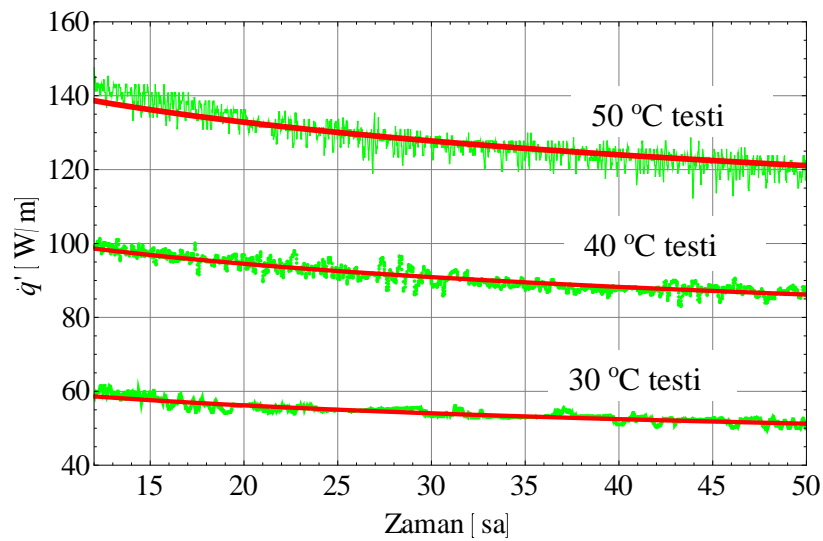
Çizelge 2.3, Kuyu 1'in farklı ortalama sıcaklıklarda 0-50 saat arası test sonuçlarını göstermektedir. Sıcaklık arttıkça ısıl iletkenlikler arasında ölçüm belirsizlikleri de göz önüne alındığında elde edilen sonuçlarda anlamlı bir fark olmamaktadır.

Çizelge 2.3 : Kuyu1'de farklı sıcaklıklardaki test koşulları ve bulunan ısıl iletkenlikler.

		Test 1	Test 2	Test 3
Akışkan toprağa gidiş sıcaklığı	°C	30.0	40.0	50.0
Akışkan topraktan ort. dönüş sic.	°C	27.3	35.4	43.2
Ortalama Sıcaklık	°C	28.7	37.7	46.6
Debi	ℓ/dk	16.0	16.0	16.0
Elde edilen ısıl iletkenlik	W/(mK)	2.274	2.270	2.184

Fakat toprak kaynaklı ısı pompalarının gerçek çalışma koşullarında toprak tarafının akışkan sıcaklıkları ısıtma için -4, 0 °C civarında ve doğal toprak sıcaklığı ise Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi 16 °C civarında (bölgeye göre değişebilir) olmaktadır. Bu toprakla akışkanın arasında 16-20 °C sıcaklık farkı olduğu anlamına gelir. Eğer soğutma durumu için benzer fark sağlamak istenirse uygun test sıcaklığı 32-36 °C civarında olmalıdır.

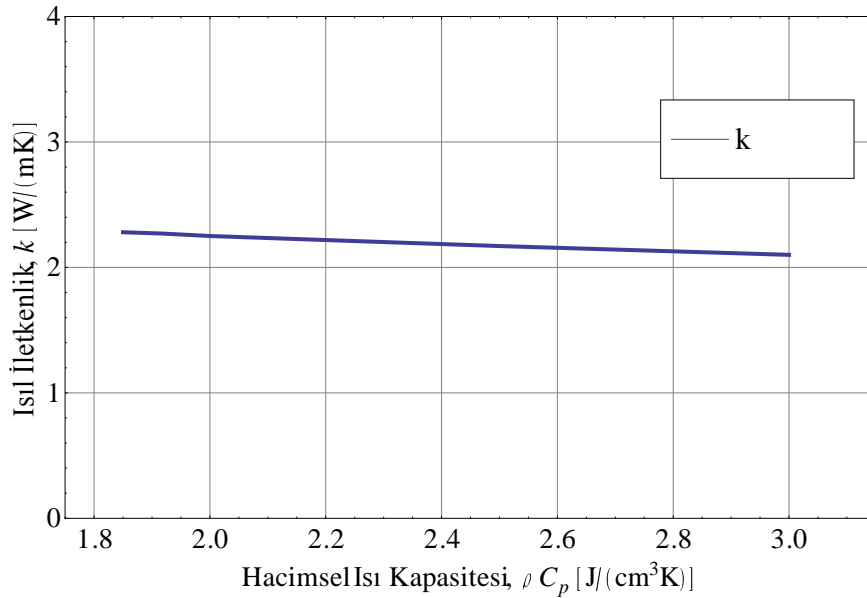
Şekil 2.10 ve Çizelge 2.3'ten görüldüğü gibi test sonuçları ile elde edilmiş ısıl iletkenlik sonuçları 30 °C, 40 °C ve 50 °C testleri için neredeyse aynıdır.



Şekil 2.10 : Kuyu 1 için farklı sıcaklıklardaki deneysel veriler ve Denklem (2.17) kullanarak elde edilen denkleştirilmiş eğriler.

2.5.2 Toprak yapısının sonuçlara etkisi

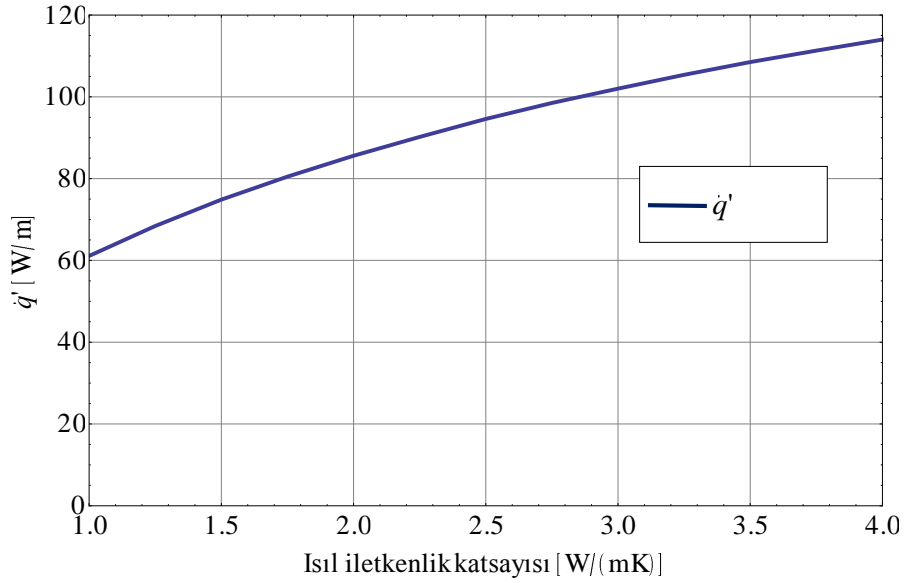
Burada önerilen modelde hacimsel ısı kapasitesi, ρC_p 'nin değeri, bazı modellerde olduğu gibi (Banks, 2012; Gehlin, 2002) sabit olarak girilerek ısı iletkenlik elde edilmiştir. Modelde hacimsel ısı kapasitesinin değişiminin ısı iletkenlik üzerine etkisi Şekil 2.11'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.11: Hacimsel ısı kapasitesinin ısı iletkenliğe etkisi.

Şekilde de görüldüğü gibi hacimsel ısı kapasitesinde % 62'lik değişim (1.85-3.00 J/cm³K) ısı iletkenlik (k_t) değerinde sadece % 8'lik bir değişime neden olmuştur. k_t deki bu %8'lik değişim ise Şekil 2.12'de görüldüğü gibi \dot{q}' değerinde %2.9-3.8 etkiye neden olur. Bu durumda ρC_p değerinin test yapılan alandan elde edilen toprak örneklerine dayanarak tahmini bir değerde sabit olarak girilmesinin sonuçları çok fazla etkilemeyeceği söylenebilir.

Toprak altındaki toprak yapısında gözenekler bulunabilir, bu gözenekler boşluk veya su içerebilir ayrıca toprağın farklı bölgelerinde farklı jeolojik yapılar bulunabilir ve bu durum kuyunun ısı geçiş özelliklerini etkileyebilir. Bu kadar karmaşık olan ve TID uygulama bölgesinde toprak altı yapısının tamamının öngörülmesi mümkün olmaması ya da çok pahalı bir işlem olması nedeniyle ısı tepki testi yapılan kuyunun civarındaki toprak yapısının TID alanındaki diğer kuyular için de geçerli olacağı varsayımı yapılır. Isıl tepki testi sırasında toprağın ısı geçiş özelliklerini temsil etmek üzere sadece iletim olduğu varsayımına dayalı bir model kullanılıp elde edilen ısı iletkenlik de etkin ısı iletkenlik olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.12 : Toprak ısıl iletkenliğinin ortalama birim ısı yüküne etkisi.

Toprak altında su akıntısı bulunması durumunda toprağın etkin iletkenlik değeri doğal olarak toprak ısıl iletkenlik değerlerinden yüksek çıkabilmektedir. Toprak altındaki su akıntısı Sanner (2005) yöntemi ile basit bir şekilde tespit edilebilir ve toprak özellikleri ile ilgili gerçek değerler Wagner (2015) yöntemi ile bulunabilir.

Bu deneyde elde edilen toprağın etkin ısıl iletkenlik değeri 2.2-2.3 W/(mK) toprağın sondaj işlemi sırasında çıkan toprak yapısının çoğunluğunu oluşturan grovak'ın ısıl iletkenlik değeri 2-5 W/(mK) arasında değişebileceği (Banks, 2012 ss:428) göz önüne alınarak elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.

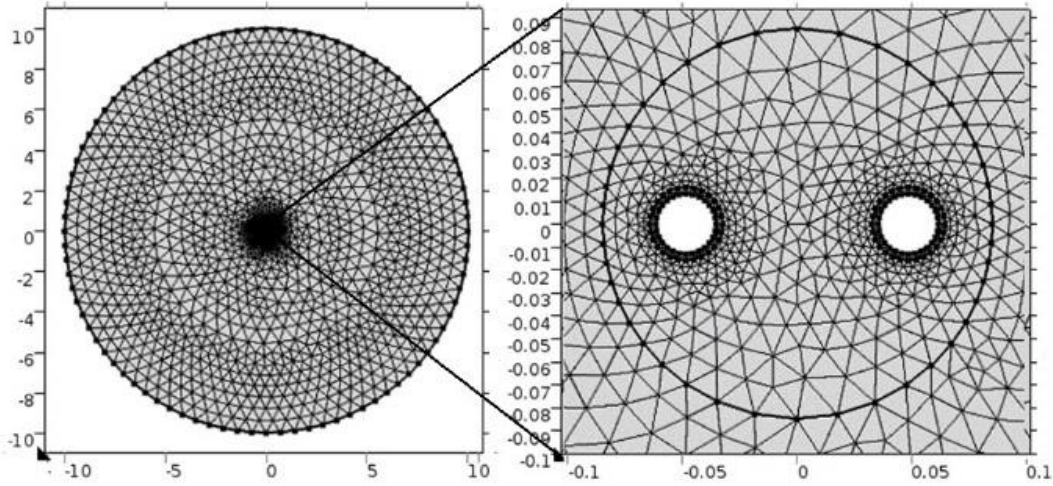
2.6 Modelin Doğrulaması

Sonuçları sayısal modelle doğrulamak için Çizelge 2.4'te özellikleri verilen 2 boyutlu Comsol (2013) modeli kurulmuştur (Şekil 2.13). Dış ortamın sınırı incelenen süre içerisinde sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyeceği kadar büyük seçilmiştir.

Çizelge 2.4 : Çalışma alanlarının özellikleri.

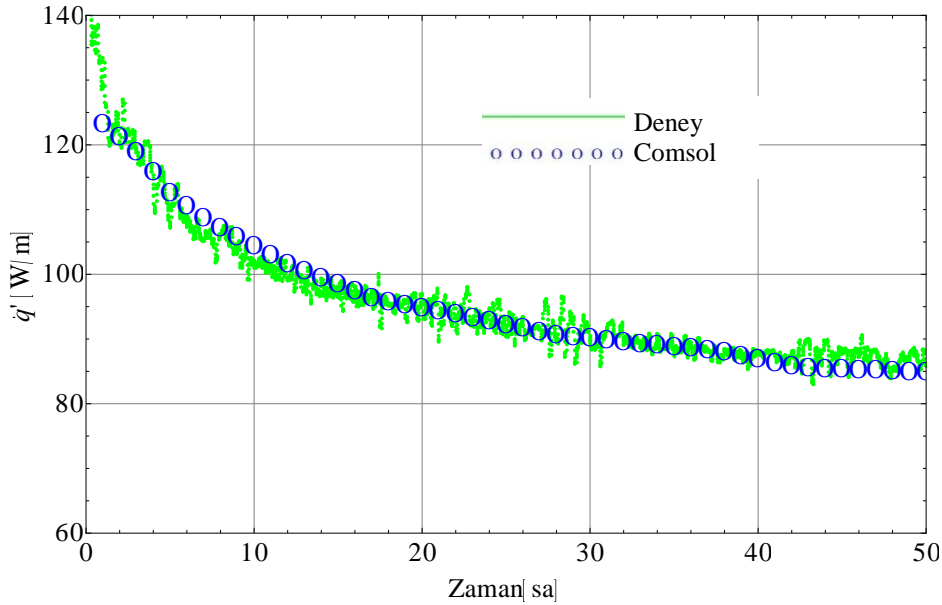
		Toprak	Dolgu	Boru
Yoğunluk	kg/m ³	2130	1760	959
Isıl kapasitesi	J/(kgK)	900	900	1900
Isıl iletkenlik	W/(mK)	-	Çizelge 2.2'de	0.38

Modelleme işleminde, boru ve dolgu özellikleri modele girilmiş ve en iyi örtüşmeyi elde etmek için toprağın iletkenliği değiştirilmiştir. En iyi örtüşmeyi sağlayan toprak ısıl iletkenliği, denklem (2.13) ile aynı olarak Kuyu 1 için 2.27 W/(mK) bulunmuştur.



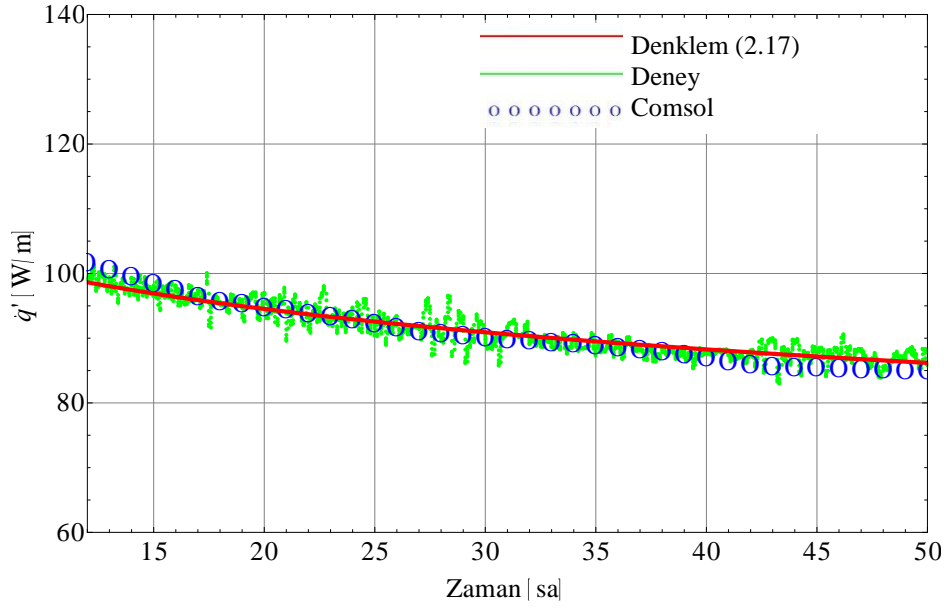
Şekil 2.13 : Comsol modeli ve ağ yapısı.

Comsol modeline deneyden elde edilen giriş, dönüş sıcaklık değerleri girilerek çözüm yapıldığı için testin ilk zamanlarından itibaren girilen ısı iletkenlik değeri için deney sonuçları ile uyumludur (Şekil 2.14).

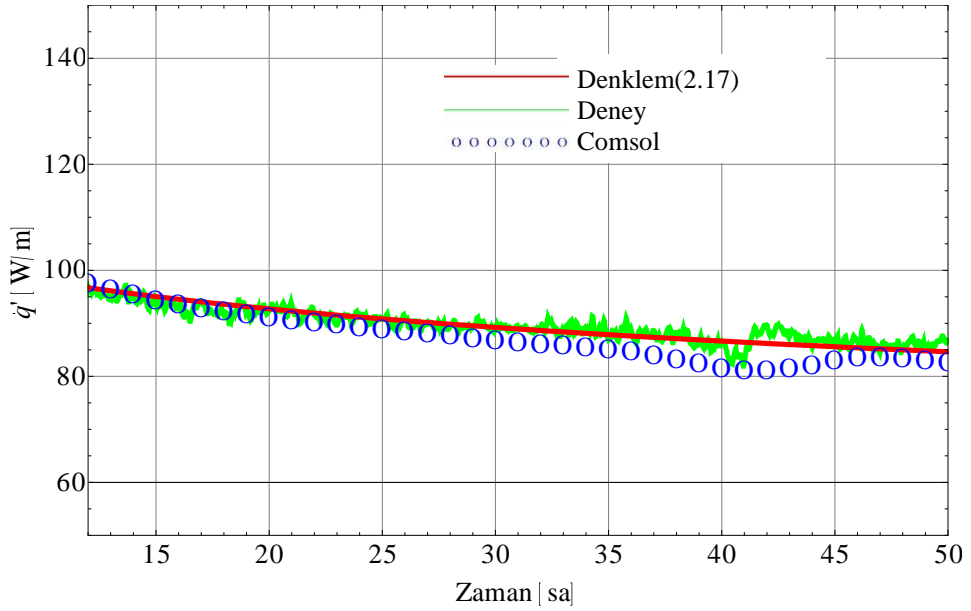


Şekil 2.14 : Kuyu 1 için deneysel veriler ve Comsol modelinin sonuçları, ($k_f: 2.27 \text{ W/mK}$).

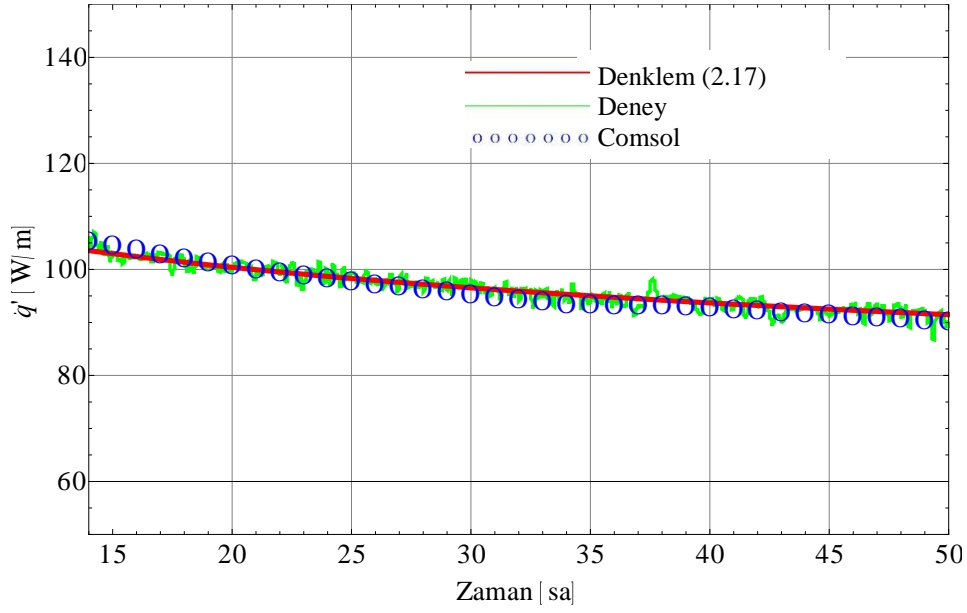
Deneysel veriler ile model örtüştürülerek iletkenlik katsayısı bulunmuş ve daha sonra modelde kullanılarak elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar 1, 2, 4 ve 5 kuyuları için sırasıyla Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18'de verilmiştir.



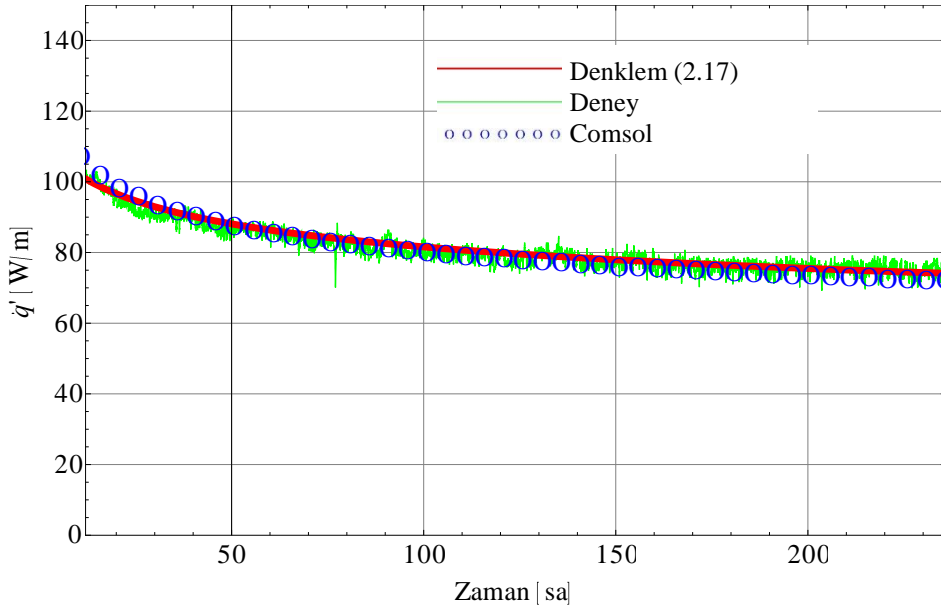
Şekil 2.15 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 1'e ait deneysel veriler ile *Comsol* modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.27 W/mK, $r_{eş}$:25.8mm).



Şekil 2.16 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 4'e ait deneysel veriler ile *Comsol* modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.47 W/mK, $r_{eş}$:25.9mm).



Şekil 2.17 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 5'e ait deneysel veriler ile *Comsol* modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.39 W/mK, $r_{eş}$:27.7mm).



Şekil 2.18 : Birim uzunluktaki ısı transferinin zamanla değişimi için Kuyu 2'ye ait deneysel veriler ile *Comsol* modeli sonuçları ve örtüştürme sonrası Denklem (2.17) sonuçlarının karşılaştırılması, (k_t :2.19W/mK, $r_{eş}$:25.7mm).

2.6.1 Hata analizi

Deneysel ölçümlerde kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyetlerine bağlı olarak hata oranı tespit edilebilir. Denklem (2.14)'te debi ve gidiş-dönüş sıcaklık değerleri okunduğundan ölçüme bağlı bağıl hata aşağıdaki şekilde yazılabilir (Witte, 2013)

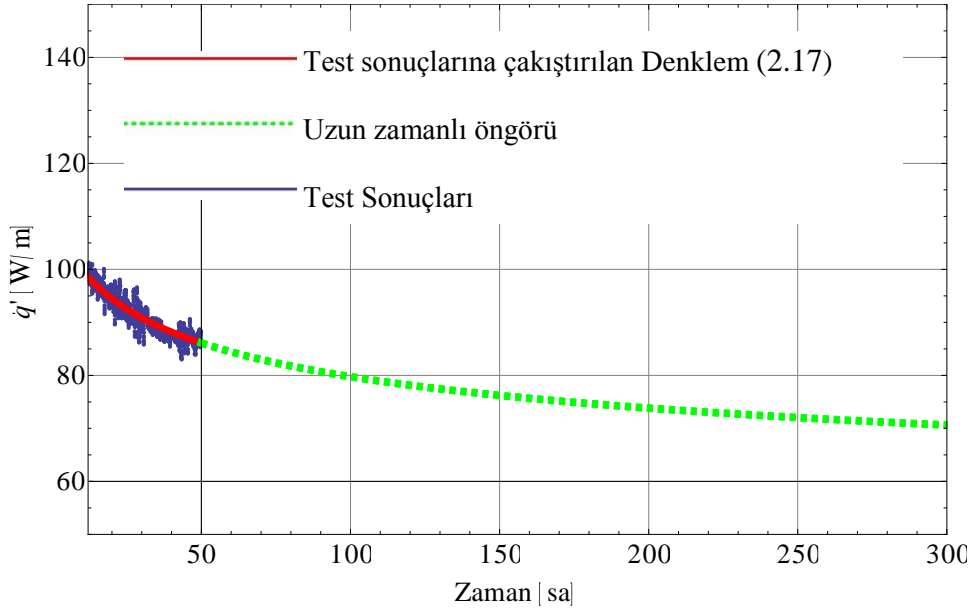
$$\frac{\delta \dot{q}'}{\dot{q}'} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\delta T_g^2 + \delta T_d^2}}{\Delta T}\right)^2} \quad (2.19)$$

Debimetrenin belirsizliği Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi $\delta \dot{m}/\dot{m} = \pm\%1$, sıcaklık sensörlerinin belirsizliği $\delta T = \pm 0.15$ K olarak verilmiştir. Suyun yoğunluğunun ve ısı kapasitesinin belirsizliği ise değerlerinin alındığı kaynakta (Witte, 2013) sırasıyla $\pm\%1$ ve $\pm\%2$ olarak sunulmuştur. Gidiş dönüş sıcaklıkları arasındaki fark (ΔT) değeri ise kuyu derinliğine ve debiye bağlı olarak değişir. Bu çalışma kapsamında seçilen debi değeri için 100 m’lik kuyuda $\Delta T = 8$ °C, 50m’lik kuyuda ise $\Delta T = 2.4-5.2$ °C’arasındadır. Bu değerlere göre testlerdeki bağıl hata $\delta \dot{q}' / \dot{q}' = 0.024-0.026$ yani % 2.4 ile % 2.6 arasındadır. Kuyularda debi değeri düşürülerek sıcaklık farkı büyütülebilir ve bağıl hata azaltılabilir.

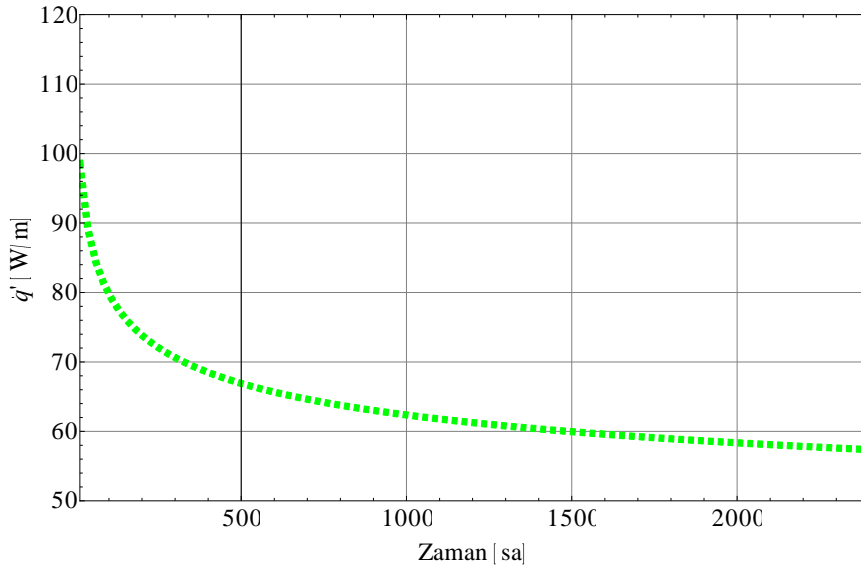
Comsol’da U borusu ve akışkan gidiş-dönüş sıcaklıkları kolayca girilebildiği için gerçek U borusu durumu ile eşdeğer çap yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmış ve eşdeğer çap yaklaşımının %2-2.8’lik bir hata ile gerçek değerleri verdiği bulunmuştur. Toprak yapısının (ρC_p) belirsizliği de katılırsa elde edilen ısı iletkenlik değerinde toplamda %12-13’lük bir belirsizlik olduğu ve bunun kabul edilebilir değerlerde kaldığı söylenebilir. Elde edilecek etkin ısı iletkenlik değerinin %10-15’lik belirsizlik ile tespit edilmesinin kabul edilir bir durum olduğu çeşitli kaynaklarda (Banks, 2012; Austin, 1998; Somerton, 1992) ifade edilmiştir.

2.7 Uzun Zamanlı Öngörüler

Eğer sistem kuyuya akışkan göndermeye devam ederse birim ısı transferi değerinin geleceği, denklem (2.17) veya denklem (2.13)’ten öngörülebilir. Örnek olarak 40 °C sıcaklığındaki akışkan, 300 saat süresince kuyuya gönderilmeye devam edilirse birim ısı transferi değerinin değişimi Şekil 2.19’daki gibi öngörülür.



Şekil 2.19 : Kuyu 1 için 40 °C çalışma sıcaklığında 300 saatlik performans öngörüsü. Eğer kuyu 2400 saat durmaksızın aynı sıcaklıkta çalıştırılırsa ısı transfer değerinin değişimi Şekil 2.20'deki gibi olması öngörülmektedir.



Şekil 2.20 : Kuyu 1 için 40 °C çalışma sıcaklığında 2400 saatlik performans öngörüsü. Bu sonuçlar toprak ısı değiştiricilerinin planlaması için kritik öneme sahiptir. Şekil 2.20, 40 °C için 2400 saatlik sonuçları göstermektedir. Benzer öngörüler farklı projeler için öngörülebilir. Bir binanın yıllık ısı yükü biliniyorsa değişik modeller kullanılarak kuyunun gelecek davranışı bulunabilir ve planlama işleminde kullanılabilir.

2.8 Optimum Test Süresinin Belirlenmesi

En uygun test süresini bulmak için Kuyu 2'deki 236 saatlik test kullanılmıştır. Test verilerinin farklı süreleri kullanılarak kuyunun ısı iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. 24, 48, 72, 96 ve 120 saatlik veriler kullanılarak bulunan ısı iletkenlik değerleri ile 236 saatlik referans veri ile elde edilen iletkenlik sonuçları karşılaştırılarak bağlı farklar verilmiştir. Farklı test süreleri ve en uzun test sonucunun ısı iletkenlik sonuçları arasındaki farklar Çizelge 2.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.5 : Kuyu 2'deki farklı test süreleri için ısı iletkenlikler ve farkları.

Test Verisi [sa]	k_r (ısı iletkenlik) [W/mK]	% Fark
24	2.23	1.8
36	2.20	0.5
48	2.19	0.0
72	2.19	0.0
236	2.19	0.0

Kuyu içerisindeki kararlı hal koşullarına, pratik olarak testin başlamasından 9-12 saat sonra ulaşılmaktadır. Bu nedenle analitik modeldeki varsayımdan ötürü testin ilk 12 saatlik verisi kullanılmamaktadır. 24 saatlik testin ikinci 12 saati ile birim ısı transferi değeri 2.23W/mK olarak öngörölmüştür. Fakat 236 saatlik veri kullanılarak öngörölen değer 48 ve 72 saatte olduğu gibi 2.19W/mK dır. 24 saat ve 240 saatlik sonuçlar arasında yaklaşık %2'lik bir fark vardır. Çizelge 2.5 incelenirse 24-36 saatlik test sürelerinin güvenilir sonuçlar elde etmek için fazlasıyla yeterli olduğu söylenebilir. Ancak bu durum elbette kuyu etrafındaki toprak yapısının tek biçimli olması ile de yakından ilgilidir. Eğer kuyudan 1~2 m ötede çok farklı oluşumlar var ise bunların ısı iletkenliğe etkisini görebilmek için daha uzun ölçüm sürelerine ihtiyaç olacaktır. Bu nedenle tek biçimli olmayan (heterojen) bir toprak altı yapısından jeolojik kestirimlerle şüpheleniliyorsa ölçüm süresini arttırmakta fayda olacaktır.

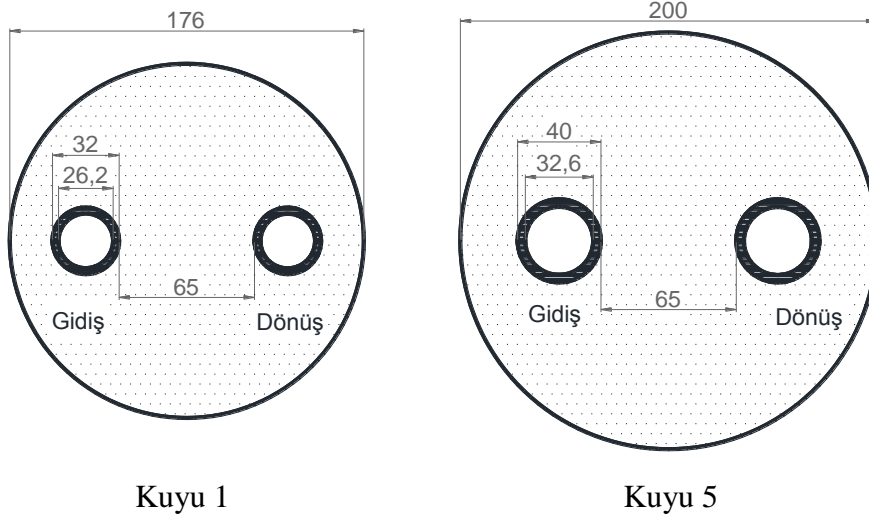
3. DÜŞEY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE PERFORMANS GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Toprak kaynaklı ısı pompalarının dezavantajlarından en önemlisi diğer sistemlere göre yüksek maliyetli olmasıdır. Toprak tarafının performansının yani toprakta gerçekleşen ısı transferinin artırılması toprak ısı değiştiricilerine olan yatırım maliyetlerinin azaltılmasını sağlayacaktır. Toprak altındaki kuyuya gönderilen akışkan ile toprak arasındaki ısı transferi, boru sayısına, akış hızına, boru çapına, borular arası etkileşime, boru geometrisine, kuyu derinliğine ve etraftaki diğer kuyularla etkileşimine bağlıdır. Bu değişkenlerin performansa etkilerini bulmak amacıyla aşağıdaki incelemeler yapılmıştır:

- Boru çapının etkisi (BOÇET)
- Borular arası mesafenin etkisi (BAMET)
- Çoklu U Borusu incelemeleri (ÇOKLU U)
- Kuyu derinliğinin etkisi (KUDET)
- Kuyular arası mesafenin etkisi (KAMET)
- Akış hızının etkisi (AHET)

3.1 Boru Çapının Etkisi (BOÇET)

Kuyu uygulamalarında genel olarak 32 mm veya 40 mm çapta boru kullanılmaktadır (Banks, 2012). Kullanılan kuyu çapı ise 100-200 mm arasında değişmektedir (Yang vd., 2010). Kuyu çaplarının etkisi üzerine çalışma yapılmasına rağmen (Luo vd., 2013) boru çapının etkisi ile ilgili olarak yapılan bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu amaçla Enstitü açık hava laboratuvarında (EK C) bulunan farklı boru çapı ve kuyu çapına sahip iki kuyu (Kuyu 1 ve Kuyu 5) kullanılmıştır. Kullanılan kuyuların özellikleri şematik olarak Şekil 3.1’te verilmiştir. Bu kuyularda diğer özellikler (borular arası mesafe, kuyu derinliği, dolgu malzemesi vb.) aynıdır.



Şekil 3.1 : Boru çapı incelemesinde kullanılan kuyuların özellikleri.

Kuyuda kullanılan dolgu malzemesi, toprak ile aynı ısı iletkenlik değerine sahip olsaydı test sonuçları doğrudan karşılaştırma için kullanılabilir ve kuyu çaplarının farklı olması sonuçları etkilemeyecekti. Fakat yapılan testler sonucunda dolgu malzemesi ve toprağın ısı iletkenlikleri farklı çıkmıştır.

Bu çalışmada boru çapları farklı olan iki kuyunun aynı zamanda kuyu çapları da farklı olduğu için kuyu çapının etkisi elimine edilmelidir. Bu etkiyi tespit edebilmek için sayısal modelleme yazılımı (*Comsol*) kullanılmıştır.

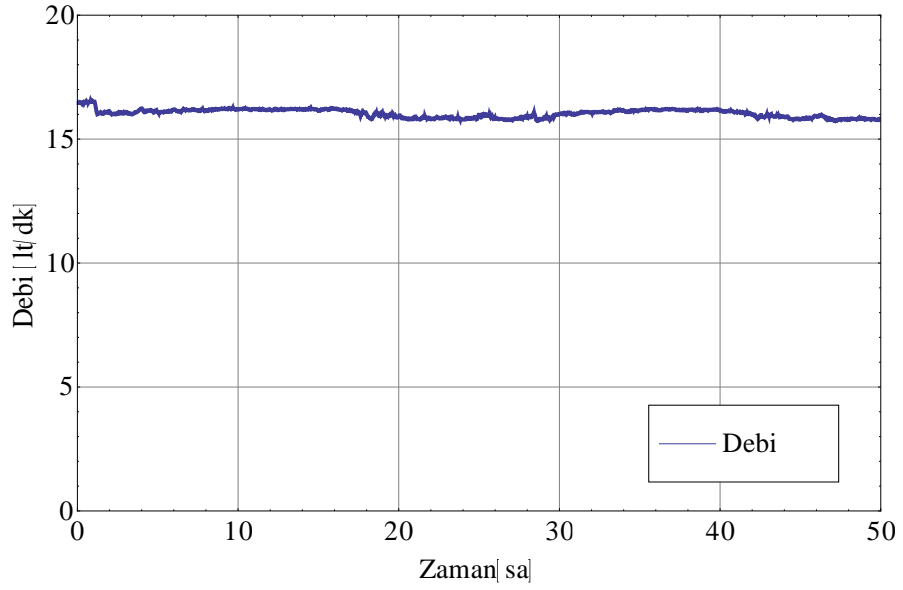
Şekil 3.1’de özellikleri verilen bu iki kuyu, farklı zamanlarda test edilmiştir. EN14511-2 standartlarına ve ısı pompası koşullarına uygun olması için test akış debisi 16 lt/dk, test sıcaklığı ise 40 °C olarak seçilmiştir. Yani Isıl Test Sisteminde (*ITES*) bu sıcaklığa getirilen su test boyunca aynı sıcaklıkta kuyuya gönderilmiştir. Tank içerisindeki suyun sabit tutulması rezistansların *PID* kontrolü vasıtasıyla sağlanmıştır. Test boyunca Kuyu 1’e giden ve dönen su sıcaklıklarının değişimi Şekil 2.8’de, debinin değişimi ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

5 no’lu kuyuda ise test süresince toprağa giden, dönen akışkan sıcaklıkları ve debi değerleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te verilmiştir.

Isı yükünün hesaplanmasında basit olarak

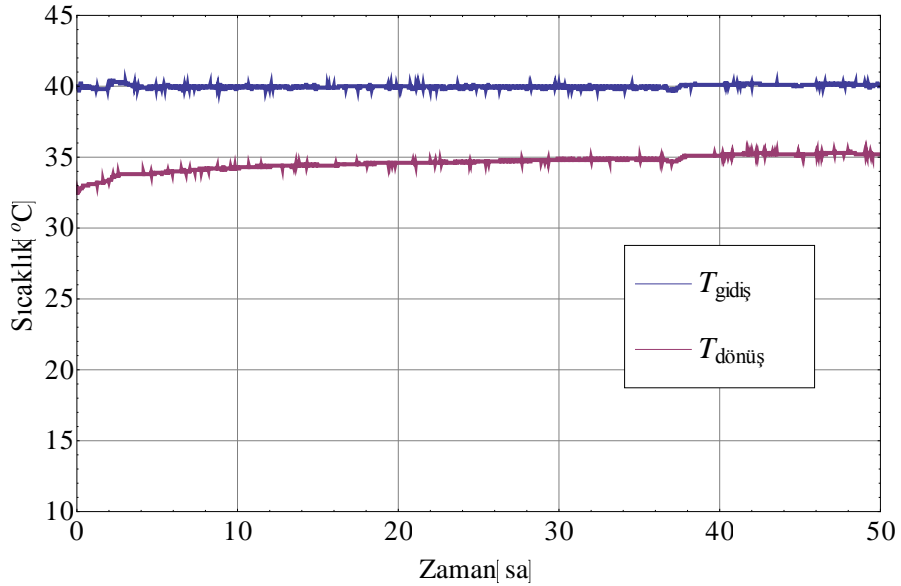
$$\dot{q}_{toplam} = \dot{m}c_p(T_g - T_d) = (\dot{V}\rho)c_p(T_g - T_d) \quad (3.1)$$

formülü kullanılmıştır.

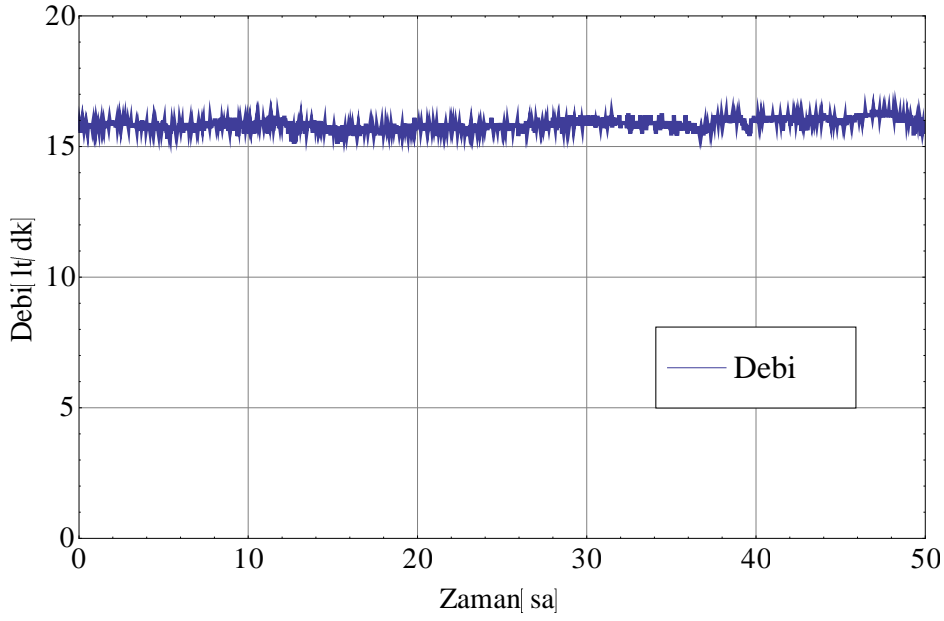


Şekil 3.2 : Kuyu 1 testi debinin test süresince değişimi.

Kuyular *ITES*'e farklı uzaklıklarda olduğu ve sadece kuyu içerisinde gerçekleşen ısı transferi inceleneceği için kuyu ile *ITES* arasında kaybedilen ısı, toplam ısı yükünden çıkartılmıştır. Bağlantı hattındaki borulardaki (Şekil 3.5) kayıp ısı için basitçe (3.2) formülü kullanılmıştır.



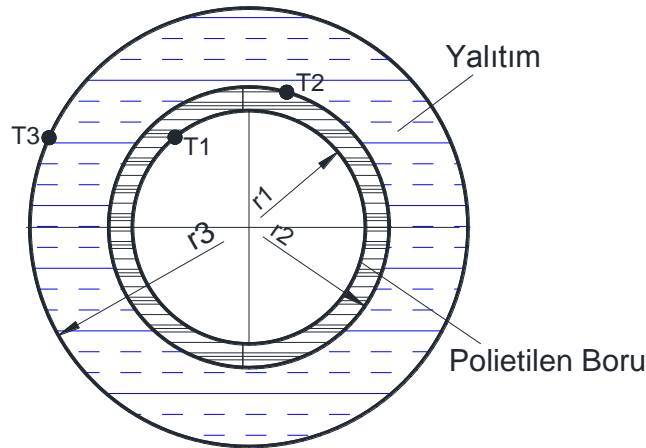
Şekil 3.3 : Kuyu 5 testi giden ve dönen su sıcaklıklarının test süresince değişimi.



Şekil 3.4 : Kuyu 5’te test süresince debinin değişimi.

$$\dot{q}'_{kyp} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi L k_{pe}} + \frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi L k_y}} \quad (3.2)$$

Burada T_1 , T_2 , T_3 , r_1 , r_2 , r_3 , L , h_1 , k_{pe} , k_y sırasıyla iç çeper sıcaklığı, boru dış çeper sıcaklığı, toprak sıcaklığı, boru iç yarıçapı, boru dış yarıçapı, izolasyonla beraber dış yarıçap, boru uzunluğu, konveksiyon katsayısı, Pe boru ısı iletkenliği ve yalıtım ısı iletkenliğidir. Taşınım ile olan ısı kaybı ifadesinde taşınım katsayısı Denklem (3.3)’de verildiği gibi *Dittus-Boelter* (Incropera ve DeWitt, 2007) yaklaşımı ile bulunmuştur.



Şekil 3.5 : Kuyu ve ısı test sistemi arasındaki bağlantı hattındaki borunun kesiti.

$$h_1 = \frac{0.023 Re^{0.8} Pr^n k_a}{2r_1} \quad (3.3)$$

Burada Re *Reynolds* sayısını, Pr *Prandtl* sayısını k_a akışkanın ısıl iletkenlik değerini göstermektedir. n sayısı yaz koşulları için 0.3, kış koşulları için 0.4'tür. Özellikler ve hesaplanan değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : BOÇET test koşulları.

Özellikler		K1	K5	Birimler
Debi	$[\dot{V}]$	16	16	lt/dk
Nominal Çap	$[d_{b,d}=2r_2]$	32	40	mm
İç Çap	$[d_{b,i}=2r_1]$	26.2	32.6	mm
Hız	$[v]$	0.48	0.32	m/s
Yoğunluk (Su-37.5 °C)	$[\rho]$	993	993	kg/m ³
Dinamik Viskozite (Su-37.5 °C)	$[\mu]$	0.686×10^{-3}	0.686×10^{-3}	Pa.s
<i>Reynolds</i> Sayısı	$[Re]$	18482	15053	-
Isı Kapasitesi (su)	$[c_p]$	4179	4179	J/kgK
Isıl İletkenlik (su)	$[k]$	0.629	0.629	W/mK
<i>Prandtl</i> Sayısı (su)	$[Pr]$	4.56	4.56	-
Taşıma Katsayısı (su)	$[h]$	2585	1789	W/m ² K
Kuyu- <i>ITES</i> arası mesafe	$[L]$	18	18.5	m
İzolasyon kalınlığı	$[r_3-r_2]$	9	9	mm
Hava Sıcaklığı	$[T_{hava}]$	9.8	8.8	°C
Toprak sıcaklığı	$[T_{z=-0.5m}]$	14.5	14.7	°C
Kuyu <i>ITES</i> arası ısı kaybı	$[\dot{q}_{kyp}]$	416	801	W
\dot{q}_{kyp} 'ta konv. ile ısı bağımlı kaybı oranı		0.2	0.3	%

Test sonucu elde edilen ortalama gidiş dönüş sıcaklıkları, Ashrae (2011) metodu ile test öncesi elde edilen *doğal toprak sıcaklığı* ve ısı yükü hesaplamalarının sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

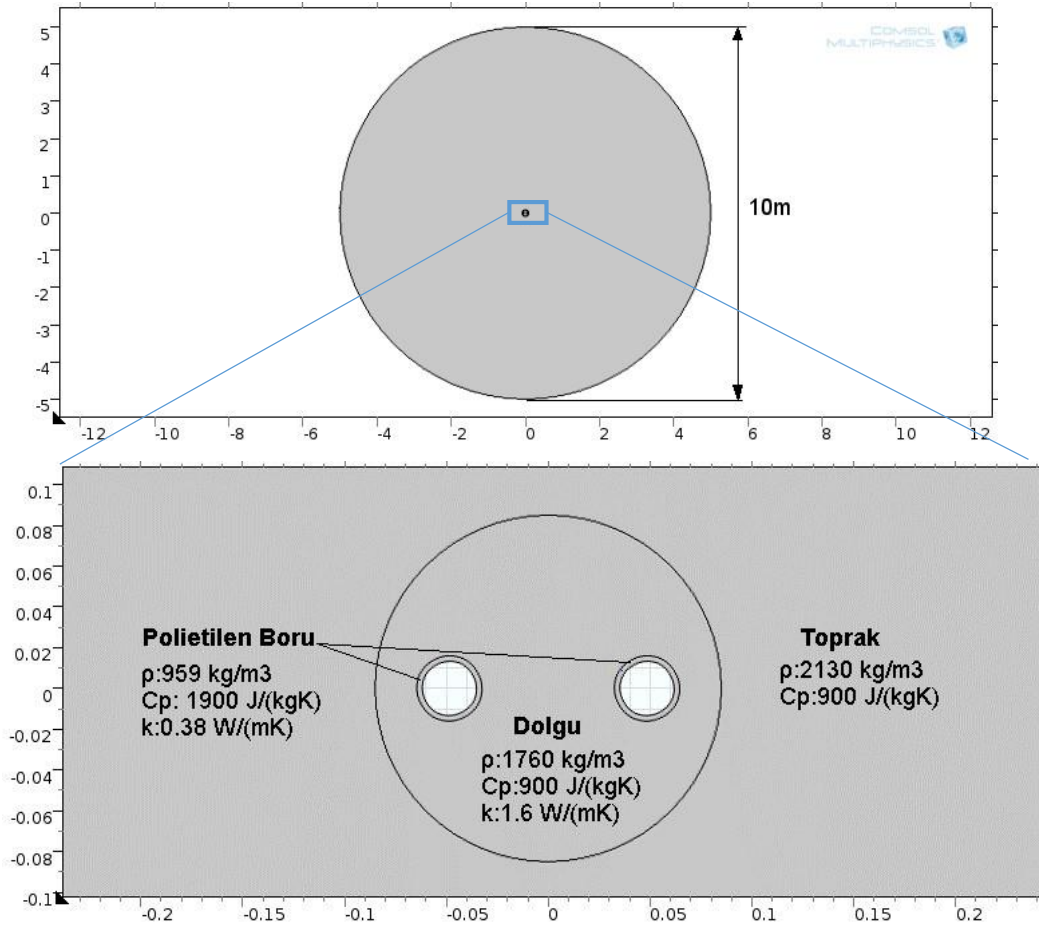
Test sonucu elde edilen veriler, *Comsol* modeli sonuçları ile örtüştürülmüştür. *Comsol* çözümlemesinde zaman bağımlı çözüm yöntemi ile sınır şartları olarak test verileri (test boyunca elde edilen tüm gidiş, dönüş sıcaklık değerleri) programa girilerek çözümleme yapılmıştır.

Şekil 3.6'da 2 boyutlu *Comsol* modeli için çözüm alanı ve özellikleri verilmiştir. Kuyu içerisinde kullanılan dolgu ve polietilen (Pe) borunun ısıl özellikleri daha önceden bilindiğinden (Şekil 3.6) test sonuçlarının modele çakıştırılması işleminde değişken olarak toprak ısıl iletkenlik (k_t) kullanılmıştır. k_t değeri değiştirilerek en düşük standart sapmayı veren değer gerçek değer olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 : BOÇET test sonuçları.

Özellikler		K1	K5	
Akışkanın toprağa gidiş sıcaklığı	$[T_g]$	40.0	40.0	°C
Akışkanın topraktan dönüş ort. sıcaklığı	$[T_d]$	35.4	34.8	°C
Ort.TID sıcaklığı	$[T_{ort}]$	37.8	37.4	°C
Doğal toprak sıcaklığı	$[T_{\infty}]$	16.3	16.1	°C
Ort.Debi	$[\dot{V}]$	16.0	16.0	lt/dk
Ort. Isı yükü	$[\bar{q}_{top}]$	5200	5948	W
Ort. Isı Kaybı	$[\bar{q}_{kyp}]$	416	801	W
Ort.Net Isı yükü	$[\bar{q}_{net}]$	4785	5145	W
Rejime geçtikten (12 saat sonrası) ort.net ısı yükü		4555	4900	W
Birim borudan elde edilen ısı yükü	$[\dot{q}']$	91.1	98.0	W/m

Comsol çözümlemesinde kullanılan diğer parametreler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

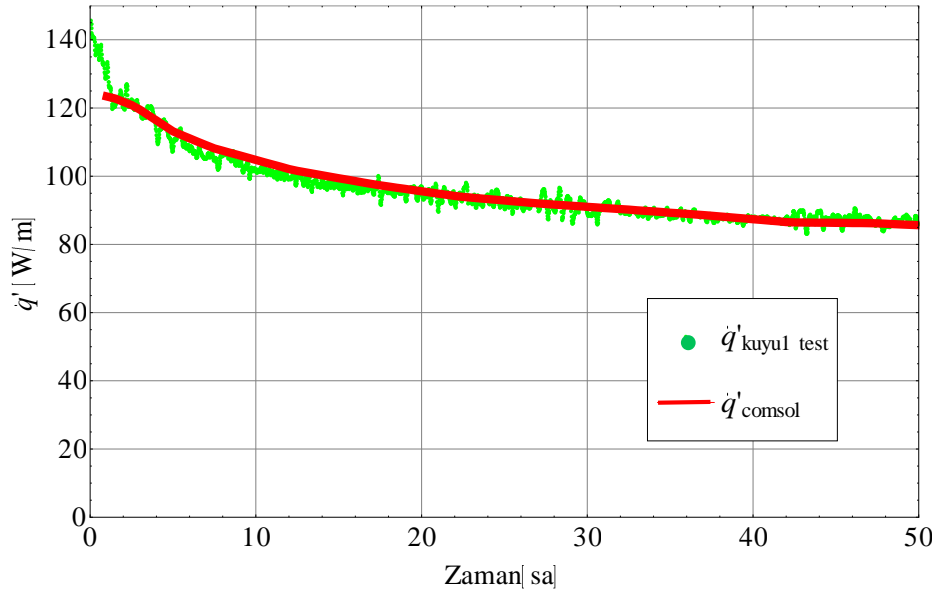


Şekil 3.6 : 2 Boyutlu *Comsol* modeli için çözüm alanları ve özellikleri.

Çizelge 3.3 : *Comsol* modelinde kullanılan parametreler.

Ağdaki hücre sayısı	4468	Adet
Ağdaki hücre geometrisi	Üçgen	Δ
Toprak alanı çapı	10	m
Dolgu alanı çapı	0.17	m
Polietilen boru çapı	0.032	m
Çözüm yöntemi	Zaman Bağımlı	
Zaman başlangıç, adım, bitiş	0:1800:180000	s
Bağımlı değişken	Sıcaklık (T)	$^{\circ}\text{C}$
Sınır ve Başlangıç Şartları (Model Girdileri)		
Sol PE boru iç çeperi	T_g	$^{\circ}\text{C}$
Sağ PE boru iç çeperi	T_d	$^{\circ}\text{C}$
Dış çözüm alanı (toprak) çeperi	T_{∞}	$^{\circ}\text{C}$
Başlangıç Şartı	T_{∞}	$^{\circ}\text{C}$

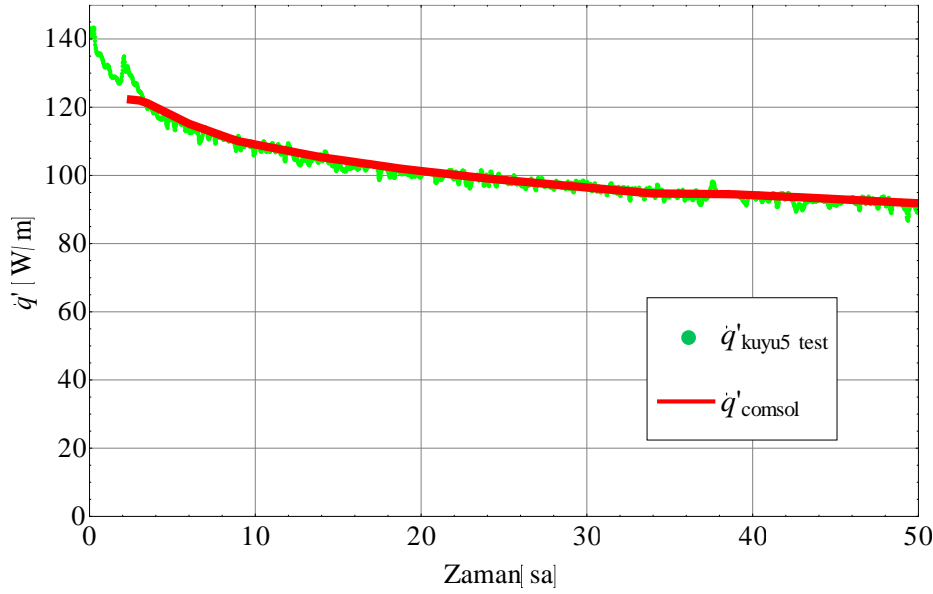
Birim ısı yükünün zamanla değişiminin eğrisi ve bu eğriye en uygun *Comsol* modeli ile elde edilen eğrinin karşılaştırması Kuyu 1 ve Kuyu 5 için Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Kuyu 1 testi süresince birim ısı yükünün zamanla değişimi ve örtüşürme sonucu *Comsol* ile elde edilen eğri.

Elde edilen k değerleri dolgu için $1.7 \text{ W}/(\text{mK})$, Kuyu 1 toprak için $2.3 \text{ W}/(\text{mK})$, Kuyu 5 için ise $2.4 \text{ W}/(\text{mK})$ dir. Kuyu içerisindeki dolgunun ısı kapasitesi nedeniyle $5r_k^2/\alpha$ kadar bir zaman geçmesi gerekmektedir (Eskilson, 1987). Bu değer bu çalışmada Şekil 3.6’deki toprak özellikleri değerleri kullanılarak 10-12 saat bulunur. Kuyu 1’de iki eğri (deney ve model) arasındaki 12-50 saatlik zaman aralığında ortalama değerlerdeki mutlak fark $0.08 \text{ W}/\text{m}$, diğer bir ifade ile $\%0.09$ ’dur. Standart sapma ise $2.4 \text{ W}/\text{m}$

olarak bulunmuştur (Çizelge 3.4). Kuyu 5’te ise mutlak fark 0.06 W/m, diğer bir ifade ile % 0.06’dır. Standart sapma ise 2.02 W/m olarak bulunmuştur.



Şekil 3.8 : Kuyu 5 testi süresince birim ısı yükünün değişimi ve örtüştürme sonucu *Comsol* ile elde edilen eğri.

Çizelge 3.4’e göre 40mm çaplı Kuyu 5’teki birim ısı yükü 32mm çaplı Kuyu 1’dekenden %7 daha büyüktür. Fakat kuyu çaplarının ve toprak ısıl iletkenlik değerlerinin iki kuyuda farklı olması her kuyunun içerisinde çap değişiminin ayrı olarak incelenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Buna göre her farklı kuyu çapı için iki farklı boru çapında elde edilen *Comsol* sonuçları Çizelge 3.5’te verilmiştir. Çizelge 3.5’deki sonuçlar her kuyuda ayrı ayrı boru çaplarının etkisini açık olarak göstermekte ve boru çapının 32 mm’den 40mm’e arttırılmasının performansa %4.1 - 4.8 oranında bir katkı sağladığını göstermektedir.

Çizelge 3.4 : Deneysel sonuçlarının *Comsol* sonuçlarıyla karşılaştırması.

Kuyu No	Boru Çapı [mm]	Kuyu Çapı [mm]	Debi [l/s]	T_g [°C]	T_d [°C]	Deneysel Sonuçlar		<i>Comsol</i> Sonuçları	
						\dot{q}'_{ort} [W/m]	\dot{q}'_{ort} [W/m]	\dot{q}'_{ort} [W/m]	\dot{q}'_{ort} [W/m]
1	32	176	0.265	40.0	35.6	91.1	91.1	-	
5	40	200	0.265	40.0	34.8	98.0	97.9	0.1	

Çizelge 3.5 ve Şekil 3.9’den elde edilen diğer önemli bir sonuç kuyu çapının %14 arttırılmasının performansı %3 civarında arttıracaktır. Luo vd., (2013) de yaptıkları

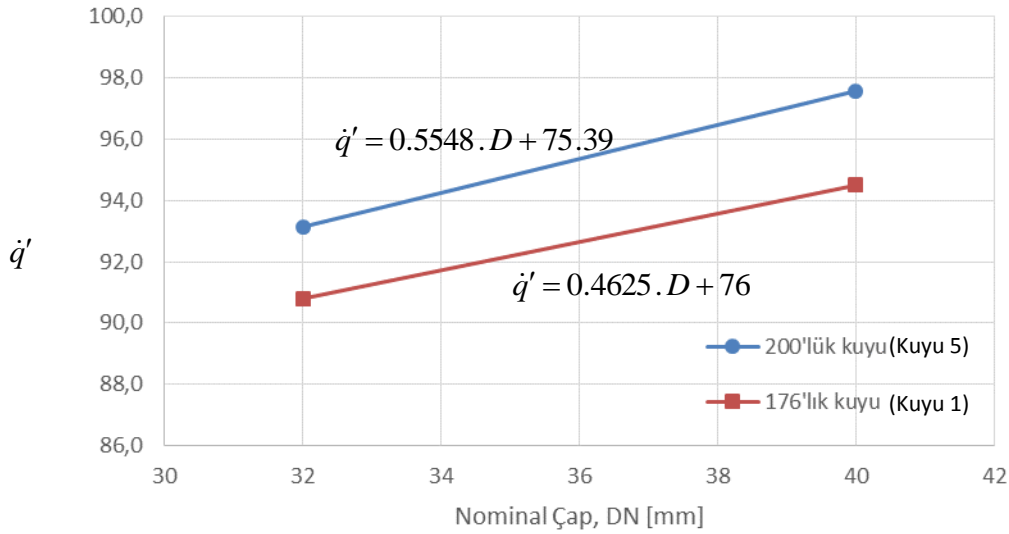
deneysel çalışma ile buradaki sonuçlara benzer şekilde kuyu çapını arttırmanın ısı yükünü arttıracığı sonucunu bulmuşlardır.

Ancak bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlardan da görülebileceği gibi bu artış oldukça küçük kalmaktadır. Bu nedenle kuyu çapını arttırmanın performansa anlamlı bir katkısının olmayacağı söylenebilir.

Çizelge 3.5: Farklı kuyu ve boru çapları için modelleme sonuçları.

Kuyu No	Boru Çapı [mm]	Kuyu Çapı [mm]	T_g [°C]	T_d [°C]	\dot{q}'_{ort} [W/m]	Fark [%]
5	40	200	40.0	34.8	97.6	4.8
	32	200	40.0	35.6	93.1	0
1	40	176	40.0	34.8	94.5	4.1
	32	176	40.0	35.6	90.8	0

Buradaki incelemelerde boru çapının artmasına karşılık debiler her durumda sabit tutulmuştur. Artan çap ile boru sürtünme kayıpları azalacağından hidrolik pompalama için gerekli güç te azalacaktır.



Şekil 3.9 : Farklı kuyu ve boru çapları için modelleme sonuçları.

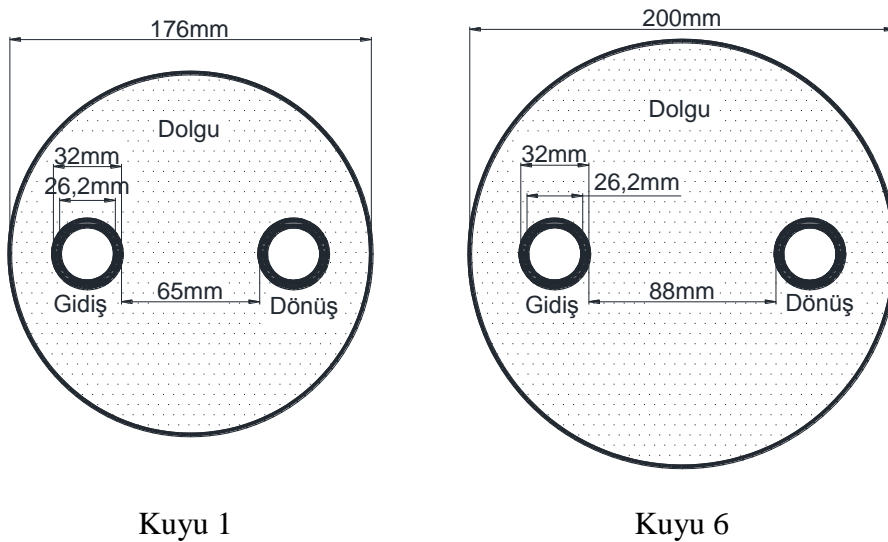
Sonuç olarak *boru çapında %25 artışa karşılık yaklaşık %4-5 ısı yükü artışı* olmaktadır. Bununla beraber boru çapının artması ile boru maliyetinin artması, uygulamanın (kuyuya indirme vb.) zorlaşması öte yandan boru çapının küçülmesi ile hidrolik gücün ve dolayısıyla enerji tüketiminin artması gibi etkenler göz önünde bulundurularak boru ve enerji maliyetlerine bağlı bir eniyileme (optimizasyon) yapılabilir.

3.2 Borular Arası Mesafenin Etkisi (BAMET)

Düşey toprak altı ısı değiştiricilerinde kullanılan U borularında boruların birbirine temas etmesi ile meydana gelecek ısı kısa devreleri önlemek amacıyla borular arasında açıklığı sabitleyen kelepçelerin kullanılması gerekmektedir. Borular arasındaki açıklık, kuyu çapına ve boru çapına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aradaki açıklığı arttırmak için kuyu çapı artırılabilir fakat bu durumda kuyuda kullanılacak dolgu malzemesi de eşzamanlı olarak artacaktır. Aradaki bu açıklığın performansa etkisinin büyüklüğünü bilmek ilave yatırıma gerek olup olmadığı hakkında fikir vermesi açısından önemlidir.

Bu amaçla İTÜ Enerji Enstitü açık hava laboratuvarında bulunan boru aralıkları farklı fakat diğer özellikleri (boru tipi, dolgu tipi vb.) aynı olan iki kuyu seçilmiştir. Kuyuların ölçüleri Şekil 3.10'da verilmiştir.

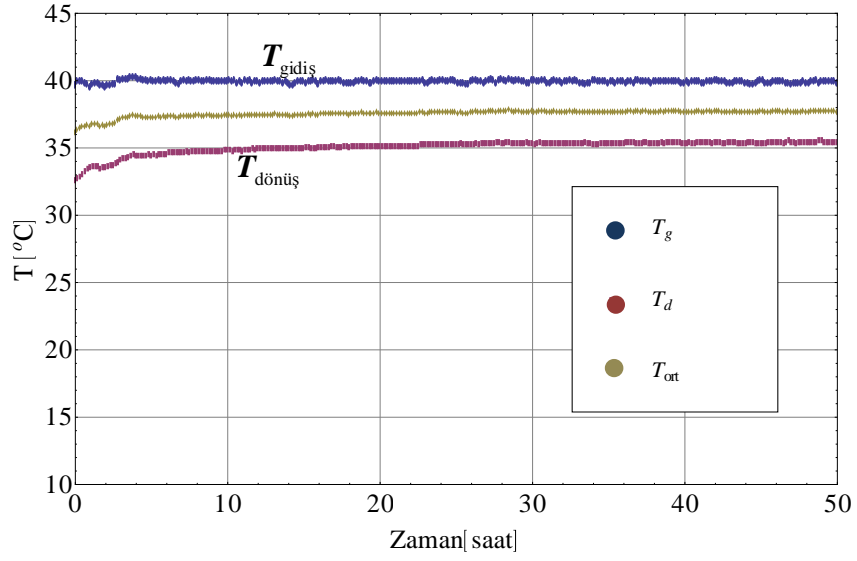
Buradaki incelemede kullanılan Kuyu 1'in birim ısı transferinin zamanla değişimi daha önceki çalışmada (*BOÇET*) deneysel ve hesaplamalı olarak elde edilmiş ve sonuçları verilmişti. Kuyu 6'nın birim ısı yükünün zamanla değişimi de daha önceki incelemelere benzer şekilde kuyuya sabit sıcaklıkta su gönderilerek deneysel ve hesaplamalı olarak elde edilmiştir. Elde edilen gidiş ve dönüş sıcaklıkları ile debinin zamanla değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



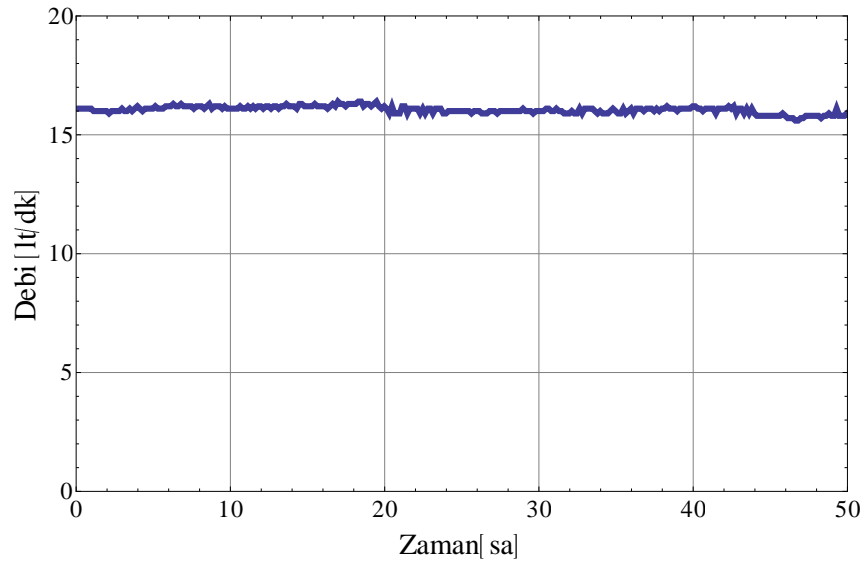
Şekil 3.10 : BAMET incelemesinde kullanılan kuyuların özellikleri.

Test koşulları Çizelge 3.6'da Kuyu 1 ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isı kayıpları atıldıktan sonra Kuyu 6 içerisindeki net birim ısı yükünün değişimi bulunmuştur.

Ayrıca deney sonucu elde edilen veriler ve *Comsol* modeli ile elde edilen eğrilerin karşılaştırılması Şekil 3.12’te verilmiştir.



a)



b)

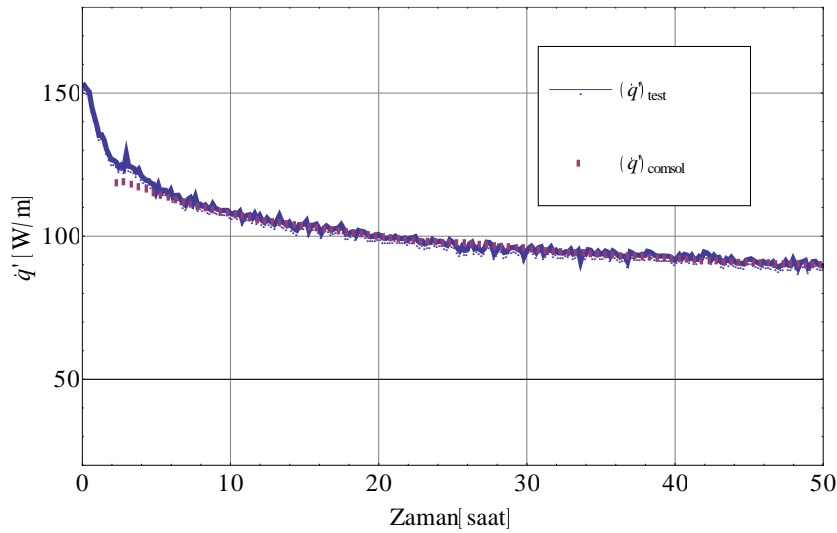
Şekil 3.11 : Kuyu 6 testi sırasında a) gidiş ve dönüş sıcaklıklarının ve b)debinin zamanla değişimi.

Şekil 3.12’e göre Kuyu 6 için *Comsol* eğrisi verileri ile deney verileri arasındaki ortalama fark 0.18 W/m, standart sapma 1 W/m olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre farklı boru aralıklarına sahip iki kuyunun deneysel sonuçlarının karşılaştırması Çizelge 3.7’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.6 : Kuyu 1 ve Kuyu 6 için test koşulları.

Özellikler		Kuyu 1	Kuyu 6	
Debi	$[Q_v]$	16	16	lt/dk
İç Çap	$[d_{b,i}=2r_1]$	0.0262	0.0262	m
Borular arası açıklık	$[ba]$	0.065	0.088	m
Konveksiyon Katsayısı	$[h]$	2585	2585	W/m ² K
Kuyu-laboratuvar arası mesafe		18	18.5	m
Hava Sıcaklığı	$[T_{hava}]$	9.8	19.1	°C
Toprak sıcaklığı	$[T_{z=-0.5m}]$	14.5	15.0	°C
Kuyu laboratuvar arası ısı kaybı		416	398	W

Çizelge 3.7’den elde edilen sonuçlara göre boru aralığının fazla olduğu kuyuda birim metredeki ısı iletimi % 5.4 daha iyi çıkmıştır. Bu kuyu aynı zamanda farklı kuyu çapına sahip olduğu için bu etkinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bunun için yine *Comsol* modelleme yazılımı ile deneyler modellenmiştir ve sonuçlar Çizelge 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Kuyu 6'nın birim ısı yükünün zamanla değişimine ait deneysel ölçümler ve aynı koşullarda *Comsol*'la elde edilen eğri.

BOÇET çalışmasına benzer şekilde burada da *Comsol* yardımı ile iki farklı kuyu çapında farklı borular arası mesafe değerleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 3.9'da karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar Şekil 3.13'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi boruların birbirine daha yakın olması durumunda performanslar eşit çıkmış artan aralıkla beraber her iki durumda da performans belirgin bir şekilde artmıştır.

Çizelge 3.7 : BAMET test sonuçları.

Özellikler		Kuyu 1	Kuyu 6	
Toprağa gidiş ort. sıcaklığı	T_g	40.0	40.0	°C
Topraktan dönüş ort. sıcaklığı	T_d	35.6	35.3	°C
Ort.TID sıcaklığı	T_{ort}	37.8	37.7	°C
Ort.Debi	Q_v	16.0	16.0	lt/dk
Ort.İsı yükü	\bar{q}	5200	5472	W
Ort. Isı Kaybı	\dot{q}_{kyp}	416	398	W
Ort.Net Isı yükü	\bar{q}_{net}	4785	5074	W
Rejime geçtikten (12.sa) sonraki net ısı yükü		4555	4804	W
Birim m'den elde edilen ort. ısı yükü	\bar{q}'	91.1	96.1	W/m

Fakat daha küçük çaplı kuyudaki artış oranı efektif ısı iletkenliği diğer kuyuya göre daha düşük olmasına rağmen daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, dolgu iletkenlik değerinin toprağın efektif iletkenlik değerinden düşük olması nedeniyle boruların çepere yaklaşması ile daha iletken olan bölgelerde bulunması ve ısı yükünün artmasıdır. Burada elde edilen sonuçlara göre kuyu çapının boruların rahat yerleştirilebileceği oranda küçük olması ve boruların kuyu çeperlerine olabildiğince yaklaştırılması ile daha iyi performans sağlanabilecektir.

Çizelge 3.8: Comsol modelinin doğrulanması için deney ve Comsol modelleme sonuçlarının karşılaştırması.

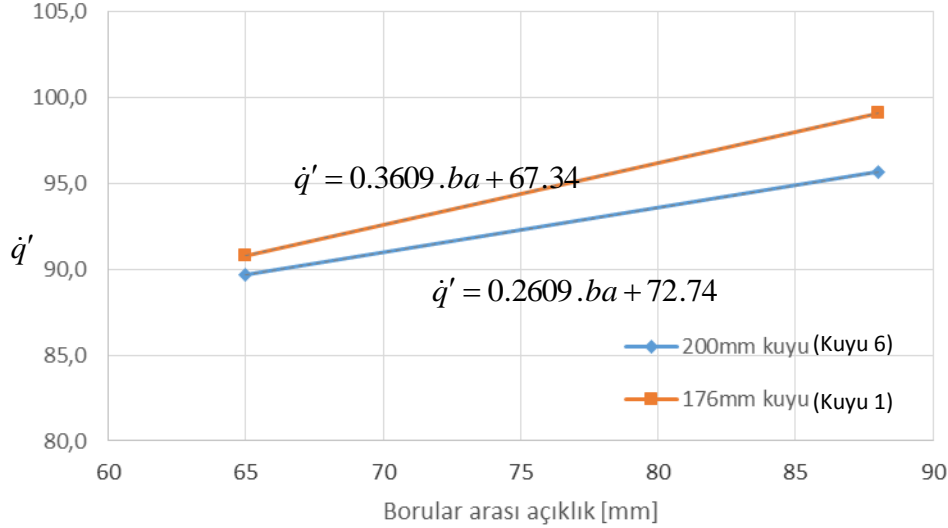
Kuyu No	ba [mm]	D_k [mm]	Debi [l/s]	T_g [°C]	T_d [°C]	Deney	Modelleme	Fark [%]
						Sonuçları \bar{q}' [W/m]	Sonuçları \bar{q}' [W/m]	
1	65	176	0.265	40	35.6	91.1	91.1	-
6	88	200	0.265	40	35.3	96.1	96.3	0.2

Elde edilen bu sonuçlardan da görülebileceği gibi boru çapını ve boru aralığını arttırmanın performansı arttırdığı deneysel olarak görülmüştür.

Çizelge 3.9 : Farklı kuyu çaplarında boru aralığı değişiminin performansa etkisi, Comsol sonuçları.

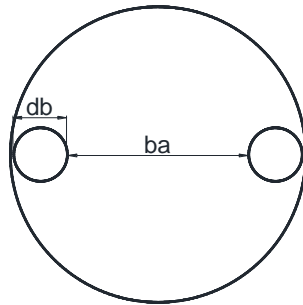
Kuyu No	ba [mm]	D_k [mm]	T_g [°C]	T_d [°C]	\bar{q}' [W/m]	Fark [%]
6	88	200	40.0	35.3	95.7	6.6
	65	200	40.0	35.6	89.7	0
1	88	176	40.0	35.3	99.1	9.1
	65	176	40.0	35.6	90.8	0

Kuyu çapının sabit tutulduğu bir kuyuda boru çapının mı ya da boru aralığının mı ısı yükünü arttıracacağı sorulursa grafiklerden elde edilen eğim katsayıları kullanılarak cevap verilebilir.



Şekil 3.13 : 200 mm (Kuyu 6) ve 176 mm lik (Kuyu 1) kuyularda borular arası açıklığın birim ısı yüküne etkisi.

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi 176 mm’lik kuyuda (Kuyu 1) boru çapının her 1 mm artışı birim ısı yükünü 0.46 W/m arttırmaktadır. Fakat boru çapının 1 mm artışına karşılık boru aralığı 2 mm azalmaktadır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Kuyu kesiti boru aralığı ve boru çapı.

Bu da Şekil 3.13’ten görülebileceği gibi ısı yükünde 0.72 W/m azalmaya yol açacaktır. Yani toplamda 0.26 W/m küçük bir azalma olacaktır. 200 mm’lik kuyu incelenirse boru çapında 1 mm artış ile 0.55 W/m kazanıma karşılık ısı yükünde yaklaşık 0.52 W/m azalma olmaktadır. Toplamda 0.03 W/m değerinde ihmal edilebilir bir artma olmaktadır. Buradan boru çapı artışının kazandırdığı ısı yükü, azalan boru aralığı ile iki borunun ısıl etkileşimleri nedeniyle sönmüldüğü görülmektedir. Bu sebeple

maliyet ve basınç kayıplarını göz önünde bulundurarak en uygun borunun seçilmesi ve imkân verdiği ölçüde çepere yakın tutulması en iyi çözüm olarak gözükmektedir.

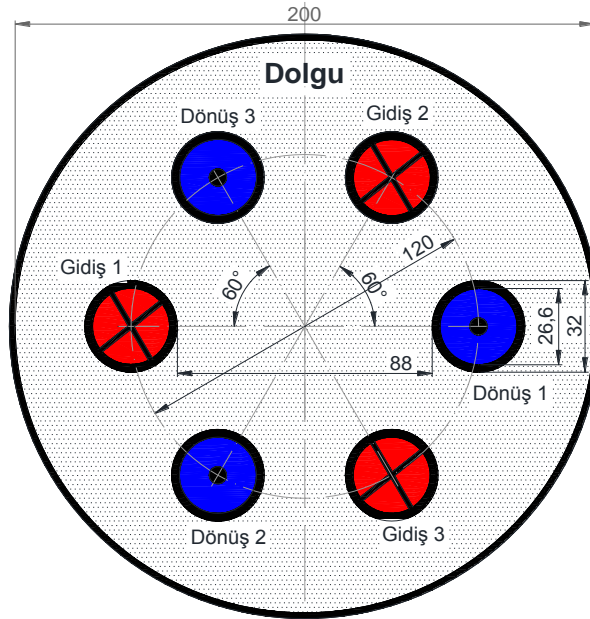
3.3 Çoklu U Borusu İncelemesi (ÇOKLU U)

Bölüm 1.8.3 'de atıf yapılan çalışmalarda kuyu içerisindeki boru sayısının artırılmasının kuyunun performansına (birim ısı transferi değerine) olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Diğer taraftan bir kuyu içerisindeki U-borusu sayısının performansa ve maliyete etkisini inceleyen bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Bu bölümde bir kuyudaki U-borusu sayısının, zamana bağlı birim ısı transferi değerine etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca çoklu U-boruları için maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuçlar TOKIP uygulamalarının mühendislik ve finansal iyileştirilmeleri için kullanılabilir. Bu bölümde verilen bilgiler, yazarın doktora tezi çerçevesinde yaptığı Aydın ve Sisman (2015) çalışmasının genişletilmiş bir anlatımını içermektedir.

3.3.1 Deneysel çalışma

Deneysel inceleme için bir kuyu açılmış (Kuyu 6) ve üç adet bağımsız U-borusu kuyu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : 3U borusu kullanılmış kuyu kesiti.

Kuyunun özellikleri ise Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : İncelemede kullanılan kuyunun (Kuyu 6) özellikleri.

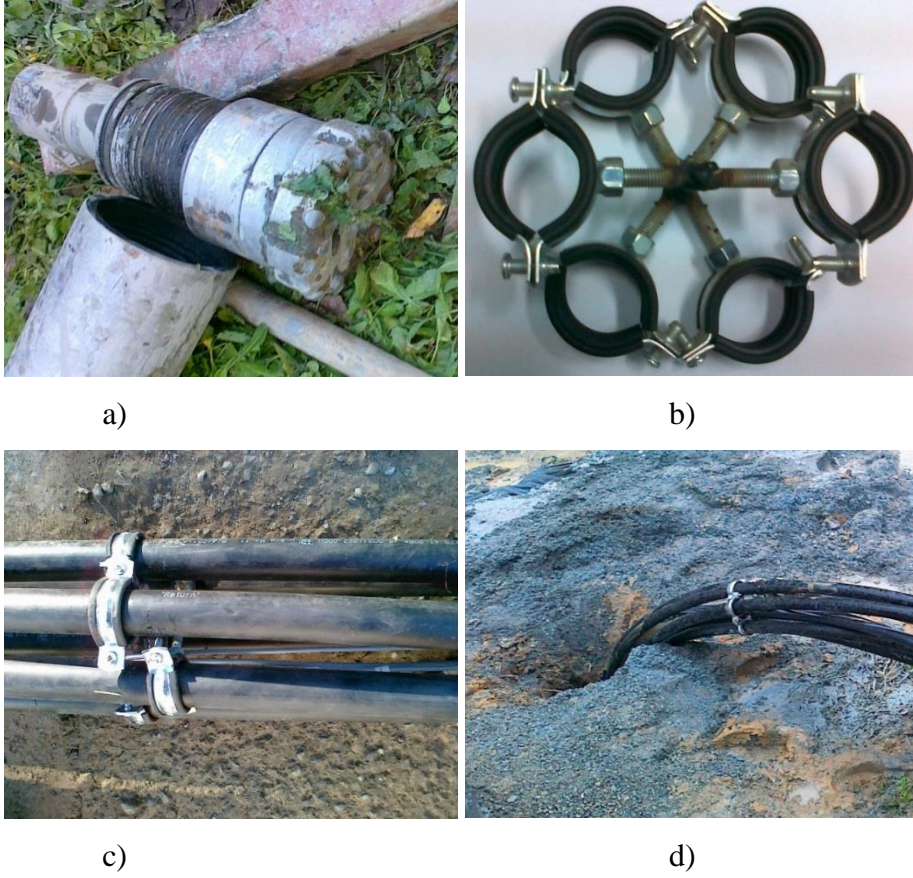
<i>Kuyu</i>		
Derinlik	50	m
Çap	200	mm
<i>U-borusu</i>		
U-borusu sayısı	3	adet
U-borusu malzemesi	PE100	
Boru iç çap	26.6	mm
Boru dış çap	32	mm
Borunun ısı iletkenliği	0.4	W/mK
<i>Kuyu-laboratuvar arası borular</i>		
Kuyu-laboratuvar arası mesafe	15	m
Yalıtım kalınlığı	9	mm
Yalıtımın ısı iletkenliği	0.036	W/mK

Genelde düşey tip Toprak Isı Değiştiricisi (TID) uygulamalarında kuyu derinlikleri 20-200m arasındadır (Yang vd., 2010). Buradaki deneysel çalışma için kısa kuyularda görülen hava sıcaklık değişimlerinden ve derin kuyularda bulunan sıcaklık artışından etkilenmemek için 50 m'lik kuyu seçilmiştir. Bu nedenle seçilen kuyu orta-ölçek düşey TID'ni temsil etmektedir. Kuyunun açılmasında 0.2m çaplı delme başlığı kullanılmıştır (Şekil 3.16a). Delmeden önce üçlü U-borusu kuyunun yanında hazırlanmıştır. Boruların birbirine temasını ve ısı kısı devreyi engellemek için özel mesafe sabitleyici kelepçeler kullanılmıştır (Şekil 3.16b). Kelepçeler TID'nin her metresine bağlanmıştır (Şekil 3.16c). Daha sonra hazırlanan TID kuyu içerisine indirilmiştir (Şekil 3.16d). Borular dolgu basılmadan önce yüksek hidrolik basınçta test edilmiştir. Dolgu olarak bentonitsiz *Mix III* (Allan, 2000) karışımı kullanılmıştır. TID'den gelen borular laboratuvardaki test sistemine bağlanmıştır. Bu bağlantı hattı toprak yüzeyinin 0.5m altındadır. Her giriş ve çıkış boruları laboratuvar test sistemine ayrı olarak bağlanmıştır. Kuyu ve test sistemi arasındaki bağlantı boruları elastomerik kauçuk yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır. Borular ITT sistemine bağlandıktan sonra borularda kalan artık hava atılarak borular teste hazır hale getirilmiştir.

Açılan kuyunun uzun zamanlı performansını öngörmek için toprağın ısı özellikleri sabit sıcaklıkta ITT ile deneysel olarak tespit edilmiştir. Test işlemleri süresince hacimsel debi, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Hava sistemden atıldıktan sonra test başlamadan önce doğal toprak altı sıcaklığı tespit edilmiş, daha sonra sistemi istenen test sıcaklığına (bu testte 40 °C) çıkarmak için *ITES*'te by-pass hattı (1, 4 ve 5 no'lu vanalar), mini-pompa ve PID kontrollü elektrik

rezistansları açılmıştır. Tank sıcaklığı test sıcaklığına ulaştığında by-pass hattı kapatılarak test başlatılmıştır.



Şekil 3.16 : a) Delme başlığı, b) Kelepçe, c) Kelepçe her 1m'de kullanıldı, d) TID kuyu içerisinde.

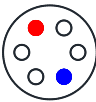
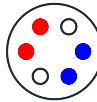
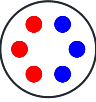
3.3.2 Deneysel sonuçlar

Testler 2 Eylül ile 27 Kasım arasında tamamlanmıştır. İlk olarak tek U-borusu test edilmiş, kuyu tekrar eski doğal sıcaklığına dönmesi için iki hafta serbest bırakılmıştır. Yenilenme süresi için literatürde herhangi bir veriye rastlanmamıştır, fakat ASHRAE standartlarına göre kuyu açıldıktan sonra kuyunun test için 4-5 gün bekletilmesi tavsiye edilmektedir. Tek U borusu test edildikten sonra iki hafta beklenerek toprak sıcaklığının doğal değerine döndüğü tekrar doğal toprak sıcaklığı ölçümü yapılarak 0.1 °C fark içerisinde doğrulanmış ve iki haftanın yeterli bir süre olduğu görülmüştür. Daha sonra çift U-borusu test edilmiş ve tekrar iki hafta yenilenmesi için bekletilmiştir. Test süreleri 70 saattir ve örnek toplama her dakikada bir veri olacak şekilde yapılmıştır. Testin yaklaşık ilk 12 saatlik kısmında toprak yerine ısıyı kuyunun dolgu betonu emdiği için sıcaklık farkı çok fazladır. Bu nedenle ortalamalar alınırken 12-70

saat aralığı göz önüne alınmıştır. Çizelge 3.11’de test değişkenlerinin 12-70 saat arası ortalama değerleri görülmektedir.

Tek U ve çift U-boruları ile deneyler sırasında diğer U-boruları kapalı olduğundan içerisindeki su durgun kalmıştır. Kapalı olan U-borularındaki suyun ısıl özelliklerinin doğal konveksiyonun tek U-borusu çalışırken elde edilen sonuçlara olası etkilerini görebilmek için tek U-borusuna sahip kuyu ile üç U-borulu fakat biri çalışan kuyular karşılaştırılmıştır. Tek U-borulu kuyudaki ısı geçişi değeri (Çizelge 3.2) ile 3U-borulu fakat biri çalışan U borusundan elde edilen değer arasındaki fark %1’den azdır. Bu fark tek ile çoklu U-boru çalışmalarının ısı transfer değerleri arasındaki farktan çok daha az bir farka sahiptir. Benzer şekilde çift U borulu 3 numaralı kuyudaki test ile çift U borusunun çalıştığı diğerinin kullanılmadığı 6 numaralı kuyudaki test arasındaki fark ta 6 numaralı kuyunun yüksek ısıl iletkenlik değeri nedeniyle % 3 yüksek olarak bulunmuştur. Bu nedenle kuyuyu çevreleyen yapı ve koşulların arasındaki olası farkı ortadan kaldırarak sadece U-borusu sayısının birim ısı transferine etkisini görmek için aynı kuyu kullanılmıştır.

Çizelge 3.11 : Farklı sayıda U-borusu uygulamalarında deney koşulları ve 12-70 saat arası deney sonuçları.

			1U-borusu	2U-borusu	3U-borusu
					
Toplam hacimsel debi	\dot{Q}_v	ℓ/dk	16.1	32.0	46.7
Borulardaki akış hızı	v	m/s	0.48	0.48	0.47
Akışkan gidiş sıcaklığı	T_g	°C	40.0	40.0	40.0
Ort. akışkan dönüş sıcaklığı	\bar{T}_d	°C	35.8	37.3	37.8
Doğal toprak sic.	T_∞	°C	17.0	17.0	17.0
z=-0.5m, de toprak sic.	$T_{z=0.5m}$	°C	25.2	22.3	18.4
Toplam ısı yükü	\bar{q}_{top}	W	4715	6025	7164
Kuyudan lab.arası ısı kaybı	\bar{q}_{kyp}	W	186	479	902
Kuyunun ısı yükü	\bar{q}	W	4529	5546	6262
Kuyunun birim ısı yükü	\bar{q}'	W/m	90.6	110.9	125.2
1U-borusu ısı yüküne göre % fark			0.0	22.4	38.3

EN14511-2 ısı pompası test standardına göre ısı pompası test sıcaklıkları B0-5/W35-55 °C olmalıdır. Diğer bir deyişle ısıtma durumunda kuyuda dolaşan akışkanın sıcaklığı 0-5 °C de ve bina tarafının ise 35-55 °C de olması gerekir. Signorelli vd.,

(2007) ısı basma ile ısı çekme testleri arasındaki farkın %3 civarında olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada ısıl tepki testinde ısı basma yöntemi ve basma sıcaklığı olarak 40 °C seçilmiştir. Seçilen akış hızı 0.48m/s dir. TID'nin ısı transfer oranı ise denklem (2.14) ile hesaplanmıştır:

Kuyuya gidiş, dönüş sıcaklıkları laboratuvarda ölçüldüğü için kuyulardan laboratuvara olan ısı kaybının da düşünülmesi gerekir. Boruların iç ve dış sıcaklıkları, boru ve yalıtım malzemelerinin özellikleri ve uzunlukları bilinmektedir, Şekil 3.5. Bu durumda bu kayıp şöyle hesaplanabilir:

$$\dot{q}_{kyp} = \frac{(T_1 - T_3)L}{\frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi k_b} + \frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi k_y}} \quad (3.4)$$

Burada k_b ve k_y sırasıyla polietilen boru ve yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlikleridir. L kuyu ve laboratuvar arasındaki boruların uzunluğudur. T_1 laboratuvardaki ölçüme göre yaklaşım yapılan boru içerisindeki akışkanın sıcaklığı, T_3 , 0.5m derinlikteki toprak sıcaklığı olarak kabul edilmiş ve her durum için Çizelge 3.11'de verilmiştir. Kuyu-laboratuvar arası kullanılan borunun kesiti Şekil 3.5'te verildiği gibidir. BOÇET incelemesinde görüldüğü gibi taşınımsal terimin ısıl dirence etkisi çok düşük olduğundan ısı kaybı hesaplarında ihmal edilmiştir. Böylece sadece kuyunun ısı transfer oranı aşağıdaki gibi kolayca hesaplanabilir:

$$\dot{q} = \dot{q}_{top} - \dot{q}_{kyp} \quad (3.5)$$

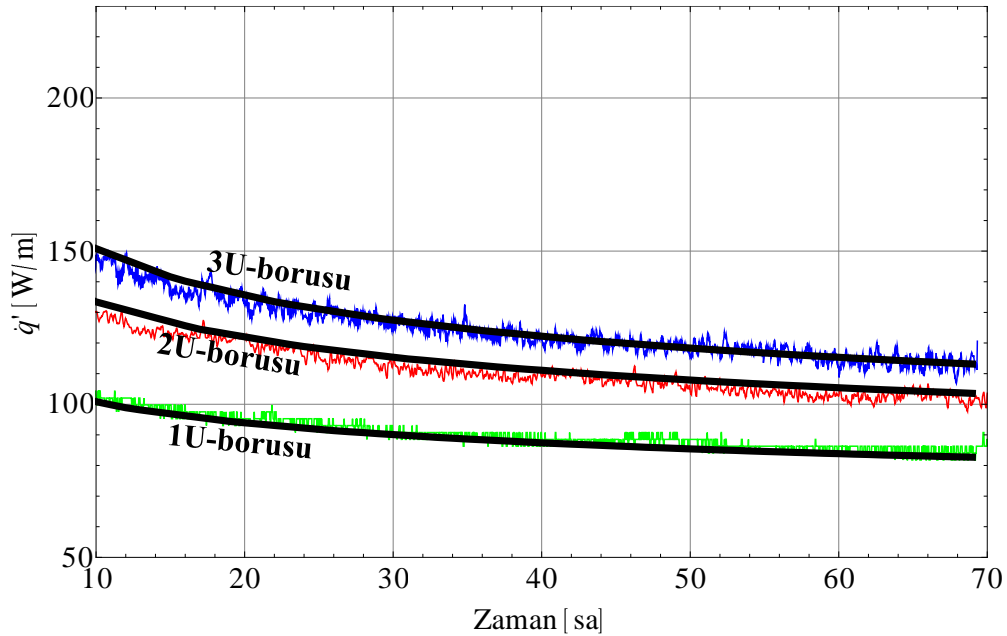
Isı kayıplarının hesaplanması sırasında her boru toprakla kapatılmış kabul edilmiştir. Fakat gerçek uygulamada borular birbirine temas edebilmekte ve ısıl olarak etkileşebilmektedir (Şekil 3.17), bu nedenle gerçek ısı kayıpları Çizelge 3.11'de hesaplanandan daha da küçüktür. Böylece U borusu sayısının artması ile performans artışı Çizelge 3.11'de verilen daha da büyük olacaktır. Performans artışını net olarak görmek açısından borular arasındaki ısıl etkileşimler ihmal edilmiştir.



Şekil 3.17 : Kanal kapatılmadan önceki kuyu ve laboratuvar arasındaki boru hatları.

Test süresince birim ısı transferi değerlerinin zamana bağlı değişimi ve *Comsol* ile elde edilen eğriler üç durum için Şekil 3.18’de verilmiştir.

Isı transfer değerinin uzun zamanlı öngörülerini yapabilmek için Bölüm 2’de anlatılan sayısal model kullanılmıştır. Test sonuçları *Comsol* ve denklem (2.17)’e denkleştirilerek toprağın ısı özellikleri tespit edilmiş ve sonra uzun zamanlı performans öngörüsü yapmak için kullanılmıştır. Toprağın ısı özellikleri Çizelge 3.12’de verilmiştir. Elde edilen toprak ısı iletkenlik değeri diğer kuyulardaki ısı iletkenliklerden yüksek çıkmıştır. Bunun tahmin edilen en önemli nedeni bu kuyunun diğer kuyulardan farklı bölgede (EK C - Şekil C.1) bulunması nedeniyle toprak nemlilik oranı ve toprak altı su akıntılarını nedenlerinden dolayı yüksek olduğudur.



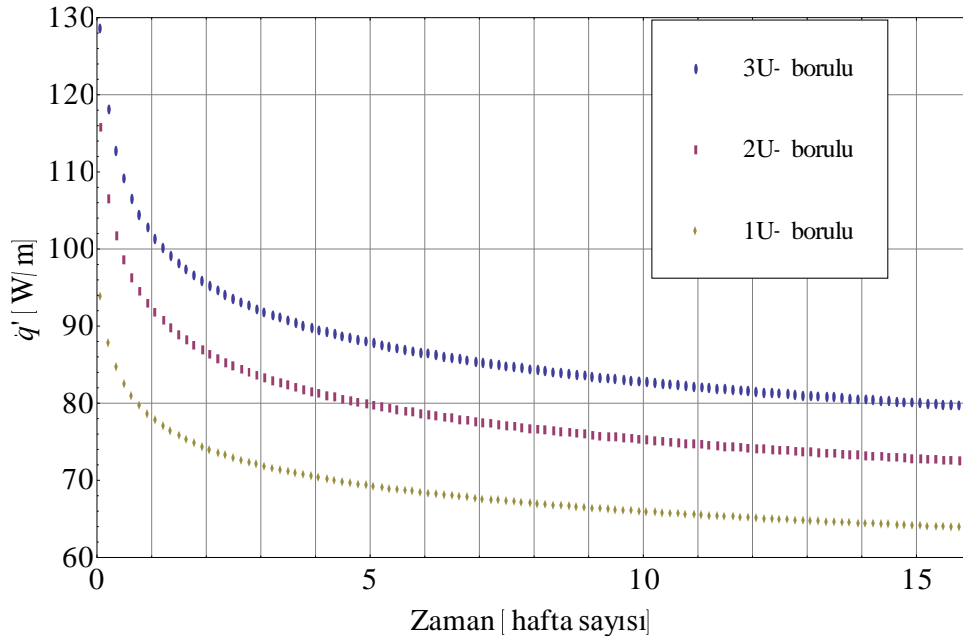
Şekil 3.18 : 1U, 2U ve 3U-boru konfigürasyonları için deneysel sonuçlar ve *Comsol* sonuçları (sürekli çizgiler).

Şekil 3.18’de üç durum için deneysel sonuçların karşılaştırılması görülmektedir. Üç U-borusu için, birim ısı transferi değeri 113 W/m, iken çift ve tek U için sırasıyla 102 W/m ve 83 W/m dir. Buradan görüldüğü gibi 70 saatlik deneysel çalışma sonunda çift ve üç U borulu deneyler tek U boruya göre sırasıyla %23 ve %36 daha iyi performans göstermişlerdir.

Çizelge 3.12 : *Comsol* modelinde kullanılan toprağın ısıl özellikleri. Isıl iletkenlik değeri denklem (2.17)’nin deneysel sonuçlarla denkleştirilmesi ile elde edilmiştir.

Sembol	Değer	Nicelik
$k_{t,eff}$	3.1	Isıl İletkenlik [W/(mK)]
$c_{p,t}$	800	Özgül ısı kapasitesi [J/(kgK)]
ρ	2130	Yoğunluk [kg/m ³]

Test süresi 70 saatle sınırlı olmasına rağmen deneysel verilerin karşılaştırılmasından sonra denklem (2.13) ile üç ayrı durum için uzun zamanlı öngörü yapılabilmektedir. Şekil 3.19 üç ayrı durum için ısı transferi oranının uzun zamanlı (16 hafta) öngörüsünü vermektedir.



Şekil 3.19 : 1U, 2U ve 3U borulu bir kuyunun birim ısı transfer değerinin uzun zamanlı öngörüsü.

Görüldüğü gibi 2 ve 3-U borulu deneyler tek U-boruya göre karşılaştırmada 16. haftanın sonundaki değerler için sırasıyla %18 ve %27 daha iyi performans vermiştir. Elde edilen bu sonuçlar 16 haftalık ortalama değerler için sırasıyla %20 ve %29 dur.

Buradan görüldüğü gibi çoklu U-borusu ile çalışmanın avantajı çalışma süresi ile azalmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü çoklu U-borulu kuyu yüksek ısı transferi oranlarına sahiptir ki bu toprak sıcaklığında görece daha hızlı bir değişime neden olur. Daha yüksek ısı transferine sahip olması sonucu kuyuyu çevreleyen toprağın sıcaklığı hızla değiştiği için ısı transfer hızı da görece daha hızlı azalır. Şekil 3.19'daki değerler kuyunun hiç durmaksızın çalışması durumu için elde edilmiştir. Gerçek bir uygulamada toprak ısı değiştiricisi bir günde 24 saat çalışmaz, gün boyunca binanın ihtiyacına bağlı olarak devreye girip çıkar. Bu nedenle gerçek çalışma koşulları altında birim ısı transfer değerleri Şekil 3.19'da verilenden büyük olur. Diğer bir deyişle bu şekildeki sonuçlar, güvenilir bir sistem planlamada yardımcı olabilecek en kötü durumu temsil etmektedir.

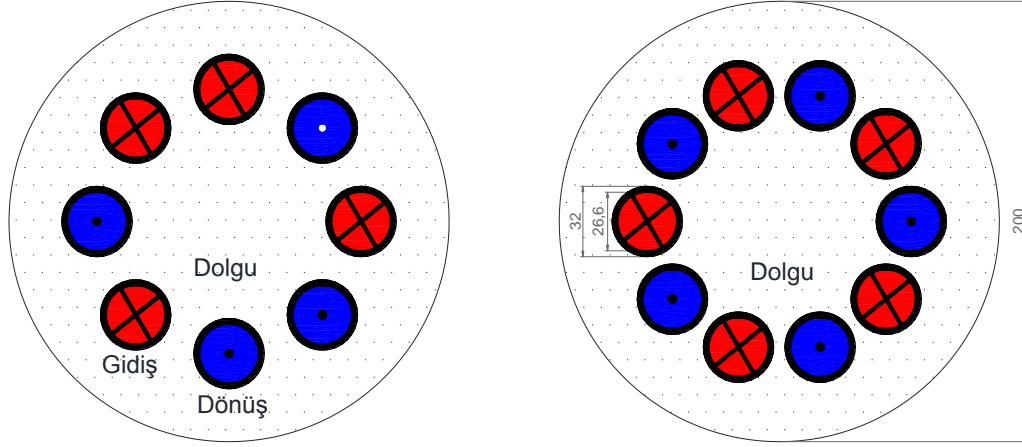
3.3.3 Bir kuyuda 4U ve 5U-boru durumlarının sayısal analizi

Şekil 3.15 incelenirse kuyunun içerisinde, 4.U hatta 5.U borusu için yeterli alan bulunduğu görülebilir. 1, 2 ve 3U-borulu kuyuların deneysel sonuçlarını öngörebilen sayısal bir modele dayanarak, 4U ve 5U-borusu uygulamaları sayısal model yardımıyla incelenebilir. Sayısal model için düşünülen 4U ve 5U-borulu kuyuların kesitleri Şekil 3.20'de verilmiştir.

Comsol ortamında hazırlanmış modelde kullanılan veriler Çizelge 3.13'te verilmiştir. Sayısal hesaplamaların ilk aşamasında sayısal model; tek, çift ve üçlü U-borulu kuyulardaki deneysel sonuçlara göre doğrulanmıştır. Diğer bir ifadeyle 1, 2 ve 3U boru deneyleri için sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, toprağın ısı özellikleri; yinelemeli olarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında en küçük ortalama mutlak hatayı (Mean Absolute Error, MAE) verecek şekilde tespit edilmiştir.

Ayrıca not edilmelidir ki sayısal model dolgu ve toprak olarak isimlendirilen iki çözüm alanı içermekte fakat analitik olanı ise tek çözüm alanı içermektedir ki o da topraktır. Bu nedenle analitik ve sayısal model ancak belirli bir zamandan sonra (~12sa) aynı sonuçları vermektedir.

Dolgunun ısı özellikleri zaten bilinmektedir toprağınki ise yukarıda belirtildiği gibi MAE minimizasyonu ile tespit edilebilmektedir. Aynı zamanda bu sayısal modelin sonuçları örtüşürme işlemi sonucu Çizelge 3.12'deki ısı özelliklerinde noktadan sonra bir haneye kadar aynı değerleri elde edilmektedir.



Şekil 3.20 : 4U-borusu ve 5U-borusu yerleştirilmiş kuyu kesitleri.

Tüm durumlar için deneysel olarak kontrol edilebilir akışkan gidiş suyu sıcaklığı 40°C olarak seçilmiştir. Diğer taraftan çıkış suyu sıcaklığı test sistemi tarafından tek, çift ve üç U-borulu kuyu deneyleri için ölçülmüştür. Bu nedenle dört ve beş U-borulu kuyuların çıkış suyu sıcaklıkları için bir yaklaşım yapmak ihtiyacı doğmuştur.

Çizelge 3.13 : Geometrik parametreler, malzeme özellikleri ve çalışma koşulları.

Sembol	Değer	Nicelik
<i>U-borusunun geometrik özellikleri</i>		
r_b	16	PE borusu yarıçapı [mm]
r_k	100	Kuyunun dış yarıçapı [mm]
r_{ca}	50	Çözüm alanı yarıçapı [m]
<i>Dolgunun ısı özellikleri</i>		
k_{dl}	0.85	Isıl iletkenlik [W/(mK)]
c_{dl}	900	Özgül ısı kapasitesi [J/(kgK)]
ρ_{dl}	1500	Yoğunluk [kg/m ³]
<i>Çalışma koşulları</i>		
T_g	40	Akışkan toprağa gidiş sıcaklığı [°C]
T_{∞}	17	Doğal toprak sıcaklığı [°C]

Gidiş ve dönüş sıcaklıkları arasındaki fark U-borusu sayısına göre incelenirse her boru içerisindeki aynı debi (16 l/dk) olduğu durum için aşağıdaki üssel ilişki elde edilebilir:

$$\Delta T = 4.166 N_U^{-0.594} \quad (3.6)$$

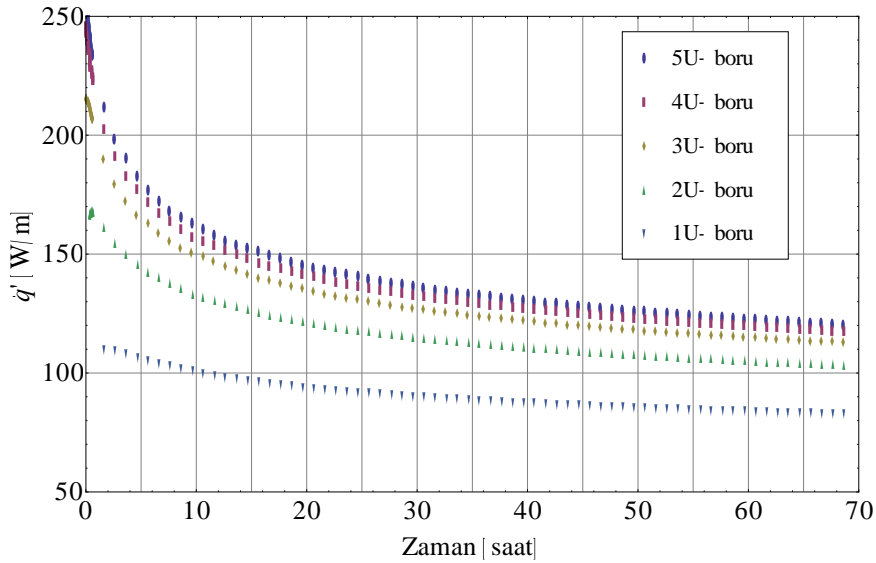
Burada ΔT ve N_U sırasıyla giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ve U borusu sayısıdır. Denklem (3.6) için R^2 değeri ise 0.9966'dır. 4U ve 5U durumları için denklem (3.6) kullanılarak ortalama sıcaklık farkı sırasıyla 1.8 °C ve 1.5 °C olarak elde

edilir. 1U ve 5U arasındaki performansların karşılaştırılmasında Çizelge 3.14'te verilen sayısal değerler kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuç arasındaki bağıl fark 1U, 2U ve 3U için sırasıyla %1.6, %2.4 ve %0.6 dır. Buradan deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.14 : Sayısal hesaplamalarda kullanılan sıcaklık değerleri ve birim ısı transferi değerleri sonuçları. 1U, 2U ve 3U deneyleri için deneysel sonuçlara dayalı ortalama değerler, 4U ve 5U için denklem (3.6) ile tahmin edilen değerler.

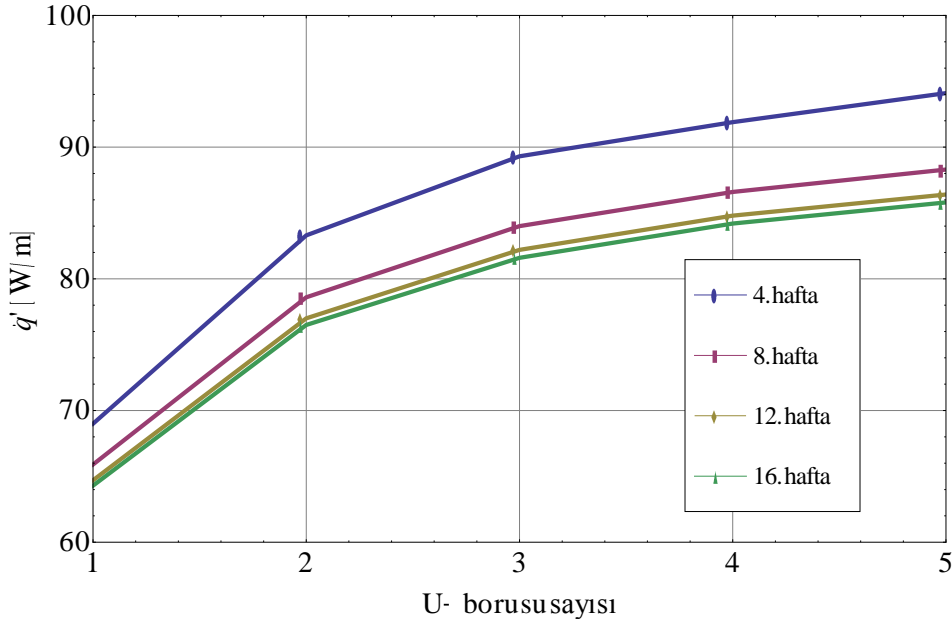
	1U	2U	3U	4U	5U
T_g [°C]	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
T_d [°C]	35.8	37.3	37.8	38.2	38.5
ΔT [°C]	4.2	2.7	2.2	1.8	1.5
T_{ort} [°C]	37.9	38.7	38.9	39.1	39.3
$\Delta(\Delta T)$ [°C]	0	1.5	0.5	0.4	0.3
Debi \dot{Q}_v [lt/dk]	16	16	16	16	16
Sayısal \dot{q}'_c [W/m]	88.4	112.8	124.4	129.7	133.0
Deneysel \dot{q}'_{den} [W/m]	89.8	110.1	125.2	-	-
Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki bağıl fark (%)	1.6	2.4	0.6	-	-
Kuyu Direnci (K m/W)	0.136	0.087	0.069	0.063	0.059

Sayısal model tarafından 1U'dan 5U'ya kadar farklı U-borusu sayıları için sürekli çalışma durumunda öngörülen birim ısı transferi değerlerinin karşılaştırması Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Farklı U-borusu sayıları için sayısal birim ısı geçişinin zamana bağlı değişimine ilişkin model sonuçları.

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi artan U sayısı ile birim ısı transferi artmakla beraber artış oranı azalmaktadır. 3U-borusundan sonra birim ısı transferi değerindeki artışın önemli bir değerde olmadığı söylenebilir. Bu durum Şekil 3.22’den de net olarak görülebilmektedir. Bu nedenle 3U-boru konfigürasyonu yüksek ısı transferi değerleri elde etmek için yeterli görülmektedir. Ancak en iyi U-borusu sayısı başta toprağın ısı özellikleri ve kuyu çapı olmak üzere farklı parametrelerden etkilenebilir.



Şekil 3.22 : 70 saat sürekli çalışma durumu için birim ısı transferi değerinin U borusu sayısı ile değişimine ilişkin model sonuçları.

3.3.4 Maliyet analizi

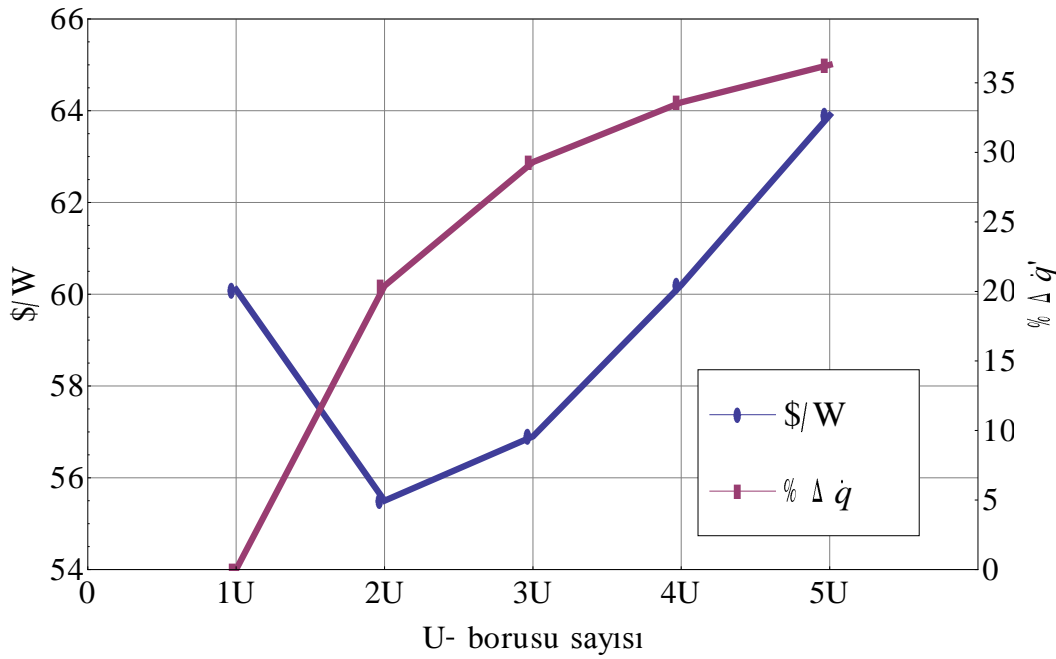
Çoklu U-borusuna sahip kuyuların maliyet analizi 100m derinlikteki örnek bir kuyu ile yapılabilir. Farklı U-borusu sayıları için boru maliyetinin içeriği Çizelge 3.15’te verilmiştir. Bir kuyunun maliyeti; temel olarak delme, polietilen borular ve dolgu maliyetlerinden oluşur. Birim fiyatlar Türkiye’deki 2015 yılı başındaki ortalama fiyatları temsil etmektedir ve ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilir.

Farklı U-borusuna sahip kuyular arasında bir karşılaştırma yapabilmek için farklı sayıda U borusu içeren kuyuların farklı kesintisiz çalışma süreleri için (4, 8, 12 ve 16 hafta) ortalama birim ısı transferi değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.16’da verilmiştir.

Çizelge 3.15 : Farklı U-borusu sayıları için 100m'lik kuyunun hesaplanan maliyeti.

Kuyu Tipi	Delme Maliyeti [\$] A	U-borusu [m]	PE Boru (4.9 \$/m) [\$] B	Boşluk [m ³]	Dolgu (200 \$/m ³) [\$] C	Toplam Maliyet [\$] A+B+C	Toplam Maliyetteki Bağıl Değişim [%]
1U'lu	3000	100	490	2.981	596.1	4086	-
2U'lu	3000	200	980	2.820	564.0	4544	11
3U'lu	3000	300	1470	2.659	531.8	5002	22
4U'lu	3000	400	1960	2.498	499.6	5460	34
5U'lu	3000	500	2450	2.337	467.5	5917	45

Birim ısı transferi değerinin birim kuyu derinliğinin maliyetine oranı ilk yatırım maliyetini azaltacak en iyi seçeneğin seçilmesi için iyi bir gösterge olabilir. Şekil 3.23, U-borusu sayısına bağlı olarak bu oranın değişimini göstermektedir.



Şekil 3.23 : U-borusu sayısına bağlı olarak birim yatırım maliyeti ile 16 hafta sürekli çalışma durumunda ortalama birim ısı transferindeki bağıl değişimler.

Şekil 3.23'teki değerler Çizelge 3.16'da verilen birim ısı transferi değerleri ve Çizelge 3.15'te verilen maliyetler kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.16 : Farklı sayılarda U-boruları için sayısal sonuçlar. Bağlı sonuçlar 16 haftanın ortalama değerleri düşünülerek hesaplanmıştır.

Kuyu Tipi	\dot{q}' @ 4. hafta [W/m]	\dot{q}' @ 8. hafta [W/m]	\dot{q}' @ 12. hafta [W/m]	\dot{q}' @ 16. hafta [W/m]	\dot{q}' 16 haftanın ortalaması [W/m]	Birim ısı transferi değerinin bağlı artışı [%] ¹⁸	Birim Maliyet [\$/W]
1U-borulu	69.0	65.9	64.7	64.3	68.0	-	0.60
2U-borulu	83.3	78.6	77.0	76.5	81.9	20	0.55
3U-borulu	89.3	84.0	82.2	81.6	87.9	29	0.57
4U-borulu	91.9	86.6	84.8	84.2	90.7	34	0.60
5U-borulu	94.1	88.3	86.4	85.8	92.6	36	0.64

Görülmektedir ki ilk yatırım maliyeti minimum değerini 2U-borulu tasarımda elde etmektedir. Diğer taraftan 5U-borulu tasarım minimum uygulama alanı gerektirmektedir. Bu nedenle *en iyi çözüm ilk yatırım maliyetini düşürmek için 2U-borulu tasarım, uygulama alanını minimize etmek için 5U-borulu tasarımın tercih edilmesidir.*

Aynı zamanda Çizelge 3.15 ve Çizelge 3.16'daki değerlere göre 4U-borulu tasarımda toplam maliyetteki bağlı artış (%34) ile birim ısı transferi değerindeki artış aynıdır. Diğer taraftan 5U-borulu tasarım için toplam maliyetteki artış %45 iken birim ısı transferi değerindeki artış %36'lardadır.

3.3.5 Çoklu U incelemesinde elde edilen sonuçlar

Bu bölümde U-borusu sayısının kuyu performansına (birim metredeki ısı akısı değeri) ve ilk yatırım maliyetine etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar 2U ve 3U-borulu tasarımların 1U-borulu ile 16 haftalık sürekli çalışma koşulları için (en kötü senaryo) karşılaştırılmasında sırasıyla %14 ve %25 daha iyi sonuçlar vermiştir. Sayısal model deneysel sonuçlar göz önüne alınarak kalibre edilmiş ve 4U-borusu ve 5U-borusu tasarımları sayısal olarak incelenmiştir. Performans artışı 2U-borusu ve 3U-borusu tasarımları için önemli iken 4U-borusu ve 5U-borusu için görece önemsiz kalmıştır.

Birim ısı güce karşılık ilk yatırım maliyeti göz önüne alınırsa en iyi tasarım *Türkiye* fiyatlarına göre 2U-borulu tasarım olmaktadır. 2U-boru tasarımı 1U-borusu olandan %8 daha ucuzdur. Diğer taraftan bu oran polietilen borunun toplam maliyete oranına

¹⁸ Bağlı artış değerleri 16 haftanın ortalama değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

bağlıdır. Eğer polietilen borunun maliyeti düşerse 3U-borulu hatta 4U-borulu tasarım en ucuz çözüm olabilir.

Uygulama alanı açısından bakılırsa 4U ve 5U-borulu uygulamada birim ısı transferindeki artış küçük olduğu için 3U-borusu ele alınan toprak özellikleri ve kuyu çapı koşullarında en uygun sonuç olarak gözükmektedir. Ayrıca çoklu U borusu tasarımları, kuyu çevresindeki toprağın sıcaklığının hızlı değişimine yol açması nedeniyle çalışma süresinin artışı ile birim ısı transferi yüksek olsa da daha hızlı azalmaktadır. Bu nedenle çoklu U-borusu tasarımlarında çalışmama zamanlarında toprağın kendini hızlı yenilemesi için kuyuların arası mesafe uzun tutulmalıdır veya kuyu etrafındaki toprağa güneş enerjisi veya başka bir kaynaktan ısı enerjisi aktarılmalıdır¹⁹.

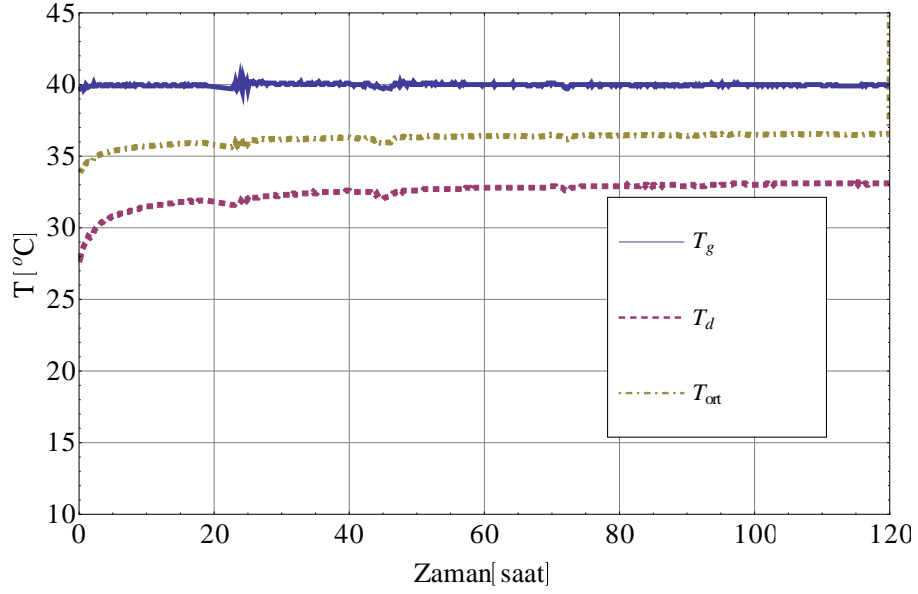
3.4 Kuyu Derinliğinin Performansa Etkisi (KUDET)

Toprak altı kuyularda derinlik arttıkça saha uygulaması zorlaşmakta ve uygulama aşamalarında süreç yönetimi zor olmaktadır. Daha sığ kuyuların uygulaması ve kontrolü daha kolay olmakta fakat toplamda aynı derinliği elde etmek için birden fazla kuyu açılması gerekmektedir. Bu durumda da kuyuların ısı etkileşimlerini küçük tutabilmek için daha geniş bir alan ihtiyacı doğmaktadır. Bu nedenlerden dolayı kuyu derinliğinin kuyunun birim ısı transferine etkisinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu bölümde, kuyu derinliğinin, birim ısı transfer değerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

3.4.1 Deneysel inceleme

Deneysel inceleme için Çizelge 2.2'de de özellikleri verilmiş olan sadece derinlikleri farklı (50 m ve 100 m) diğer özellikleri aynı olan iki kuyu (Kuyu 1 ve 4) kullanılmıştır. Testlerde, gidiş suyu sıcaklığı 40 °C ve debisi 16 l/dk olan akışkan 120 saat boyunca her bir toprak altı ısı değiştiricisine gönderilmiştir. Elde edilen dönüş suyu sıcaklıkları ve ortalama sıcaklıklar Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te sırasıyla 100 m ve 50 m kuyu için verilmiştir.

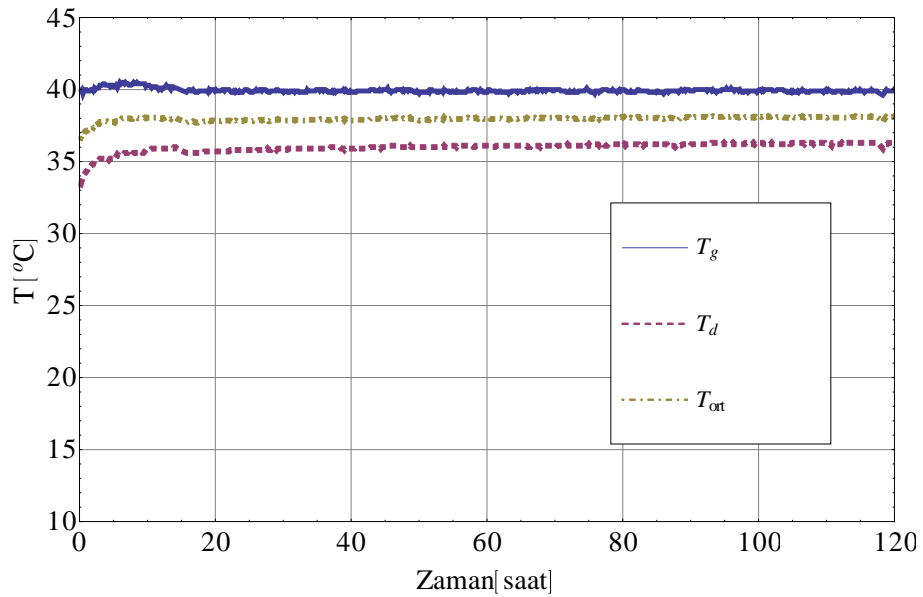
¹⁹ Kuyuların reşarj edilmesi kuyu ömürleri açısından önemli bir konudur.



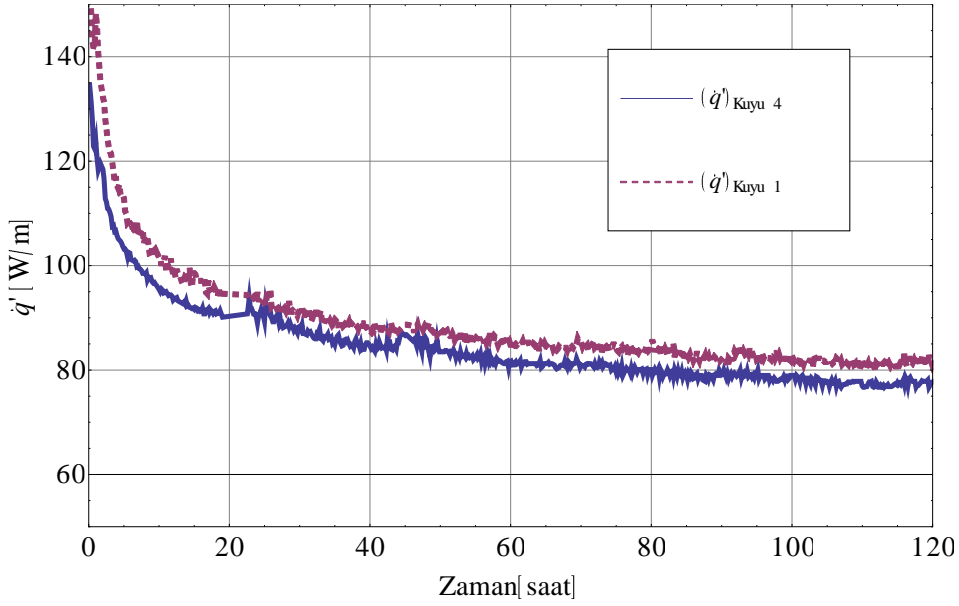
Şekil 3.24 : 100 m'lik kuyu için dönüş sıcaklığı ve ortalama akışkan sıcaklığının sonuçları.

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'den görüldüğü gibi 10-12 saatlik bir zaman diliminden sonra ortalama sıcaklıklar belli bir sabit değere yakınsamaktadır. Gidiş, dönüş sıcaklıkları ve debi değerlerine bağlı olarak birim ısı transfer değerinin değişimi denklem (2.14) den hesaplandığı şekilde Şekil 3.26'daki gibidir.

Sıcaklıkların belli bir değerde oturduğu ilk 12 saatlik zaman dilimi göz ardı edilerek elde edilen ortalama değerler Çizelge 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.25 : 50m'lik kuyu için dönüş sıcaklığı ve ortalama akışkan sıcaklığının sonuçları.



Şekil 3.26 : Kuyu testlerinden elde edilen birim ısı transferi sonuçları (Kuyu 1 ve 4).

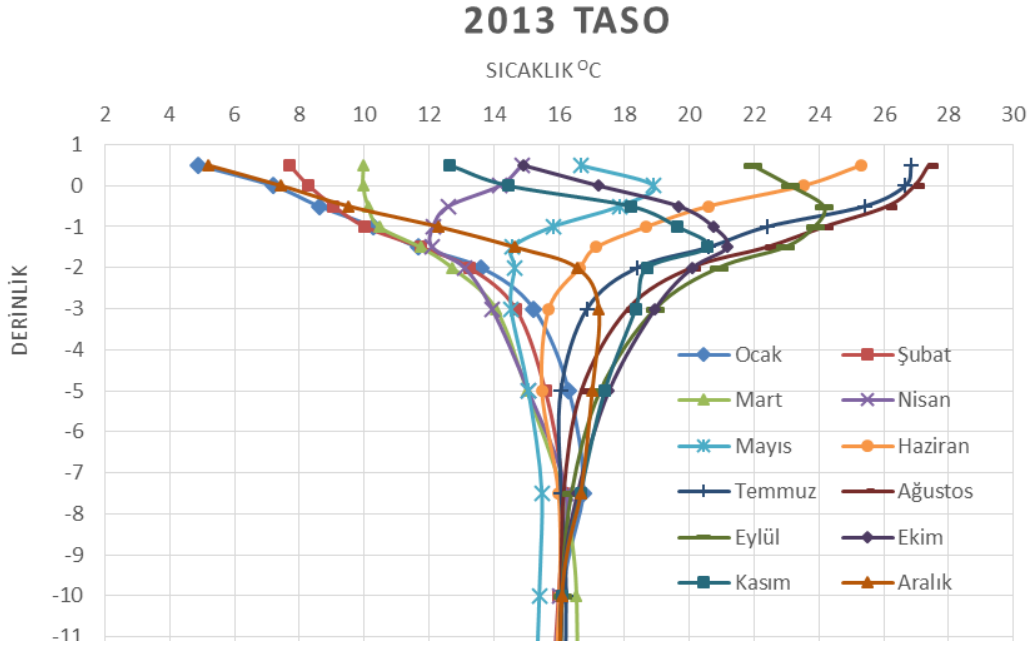
Birim metrede gerçekleşen ısı transferi açısından karşılaştırılırsa deneysel sonuçlara göre 50m'lik kuyu 100m'lik kuyuya göre %4.4 civarı daha yüksek değere sahiptir. Bölüm 2.2'de verilen kuyudan birim metre derinlikte transfer edilecek ısı formülünde Denklem (2.11) görülebileceği gibi birim ısı transferi değeri büyük oranda ortalama akışkan sıcaklığı (\bar{T}) ile ortalama doğal toprak sıcaklığı (T_∞) arasındaki farka bağlıdır.

Doğal toprak sıcaklığı Bölüm 2.4'te anlatıldığı gibi ısı test sistemi ile ölçülebildiği gibi toprak altı sıcaklık ölçümü (TASO) ve jeotermal sıcaklık haritaları ile de hesaplanabilir.

Çizelge 3.17 : Kuyu derinliği incelemesi için parametreler ve elde edilen sonuçlar.

Kuyu No	Derinlik [m]	Debi [l/s]	T_g [°C]	\bar{T}_d [°C]	T_{ort} [°C]	\bar{q}'_{ort} [W/m]	Fark [%]
4	100	0.265	40.0	32.7	36.4	82.0	0
1	50	0.265	40.0	36.0	38.0	85.6	4.4

EK A'da verilen Toprak Altı Sıcaklık Ölçümü çalışmasından elde edilen Şekil 3.27 incelendiğinde, toprak sıcaklığı 7m derinlikten sonra mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmemektedir. Bu derinlikten sonra jeotermal etki nedeniyle 0.025 °C/m (Epri, 1978) oranı ile artış olmaktadır.



Şekil 3.27 : Toprak altı sıcaklık ölçümü 2013 yılı sonuçları.

7m derinlikte sıcaklık yıl boyu 16 °C civarında olduğu göz önüne alarak ve 0.025 °C/m artış oranı ile 50m ve 100m deki T_{∞} sıcaklıkları $T_{\infty}^{50m}=17.1$ °C ve $T_{\infty}^{100m}=18.3$ °C olarak bulunmaktadır. Ortalama doğal toprak sıcaklık değerleri ise

$$\bar{T}_{\infty}^H = \frac{7 \cdot \bar{T}_{\infty}^{0-7m} + \left(T_{@7m} + \frac{0.03(H-7)}{2} \right) (H-7)}{H} \quad (3.7)$$

formülü ile basitçe hesaplanabilir.

Bu denklemde \bar{T}_{∞}^{7m} ilk 7m deki ortalama sıcaklığı, $T_{@7m}$ ise 7.metredeki sıcaklığı temsil etmektedir. Testlerin yapıldığı Eylül ayı için Şekil 3.27'den $\bar{T}_{\infty}^{7m} = 20$ °C bulunarak 50m ve 100m ortalama T_{∞} değerleri 17.0 ve 17.4 °C olmaktadır. Bu denklemlere göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.18'de görüldüğü gibi derinliğin artması ile ortalama akışkan sıcaklığı ile ortalama doğal toprak sıcaklığı arasındaki fark azalmıştır. Bu durum TID içerisinde sıcak akışkan dolaştırıldığı (ısı pompasının soğutma yapması durumu) için geçerlidir. Isı pompası ısıtma yapması durumunda toprak içerisine soğuk akışkan gönderilecektir. Soğuk akışkan daha yüksek sıcaklık tabakaları ile karşılaştığında ısı transferi daha iyi olacaktır.

Bu bölümdeki koşullarda (2.11) denkleminde göre $T_{\infty} - T_0$ değerindeki 1 K'lık artış \dot{q}' değerinde ortalama 4.2 W/m'lik artışa neden olmaktadır. Çizelge 3.17'deki sonuçlara göre 1.4 K'lık sıcaklık farkına karşılık 3.6 W/m'lik artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeninin gidiş ve dönüş boruları arasındaki ısı kısıtlı devreleri olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3.18 : 100m ve 50m'lik kuyular için test sonuçları ve hesaplanan değerler.

	H [m]	T_g [°C]	\bar{T}_d [°C]	\bar{T}_{ort} [°C]	\bar{T}_{∞}^H [°C]	\bar{q}'_{ort} [W/m]	Fark [%]	R_b [W/mK]	$\bar{T}_{ort} - \bar{T}_{\infty}^H$ [°C]
K4	100	40.0	32.7	36.4	17.4	82.0	0	0.16	19
K1	50	40.0	36.1	38.0	17.0	85.6	4.4	0.16	21

50m'lik kuyuda toprağın en sıcak olduğu dönemdeki ortalama doğal sıcaklık (T_{∞}) 16°C iken yılın en sıcak olduğu dönemde bu değer 17.2 °C'dir. Bu 1.2 °C'lik sıcaklık farkı 5W/m'lik birim ısı transferi değerine karşılık gelir. Bu da toplam %6'lık bir değişime neden olmaktadır. Daha sığ kuyularda bu değer daha da artacaktır. Bu sebeple toprak sıcaklığının çalışma sıcaklıklarının çok üstüne çıkabildiği (>40 °C) veya çok altına düşebildiği (<0 °C) durumlarda yüzeye yakın bu bölgelerin yalıtılması faydalı olacaktır.

3.4.2 Kuyu derinliğinin etkisi incelemesinden elde edilen sonuçlar

Sonuç olarak ısı pompasının yoğun olarak ısıtma amaçlı kullanılacağı durumlarda toplamda aynı derinliğe sahip iki kuyu yerine bir adet derin kuyu tercih edilmesi daha iyi sonuç verecektir. Yoğun olarak soğutma amaçlı kullanım durumu için ise sığ kuyular, derin kuyulardan daha iyi olacaktır. Fakat derinlik azaldıkça mevsimsel sıcaklık değişiminden etkilenmesi artacaktır. Etkilenen bölgenin yalıtılması veya çok derin olmayan kuyuların kullanılması gerekmektedir.

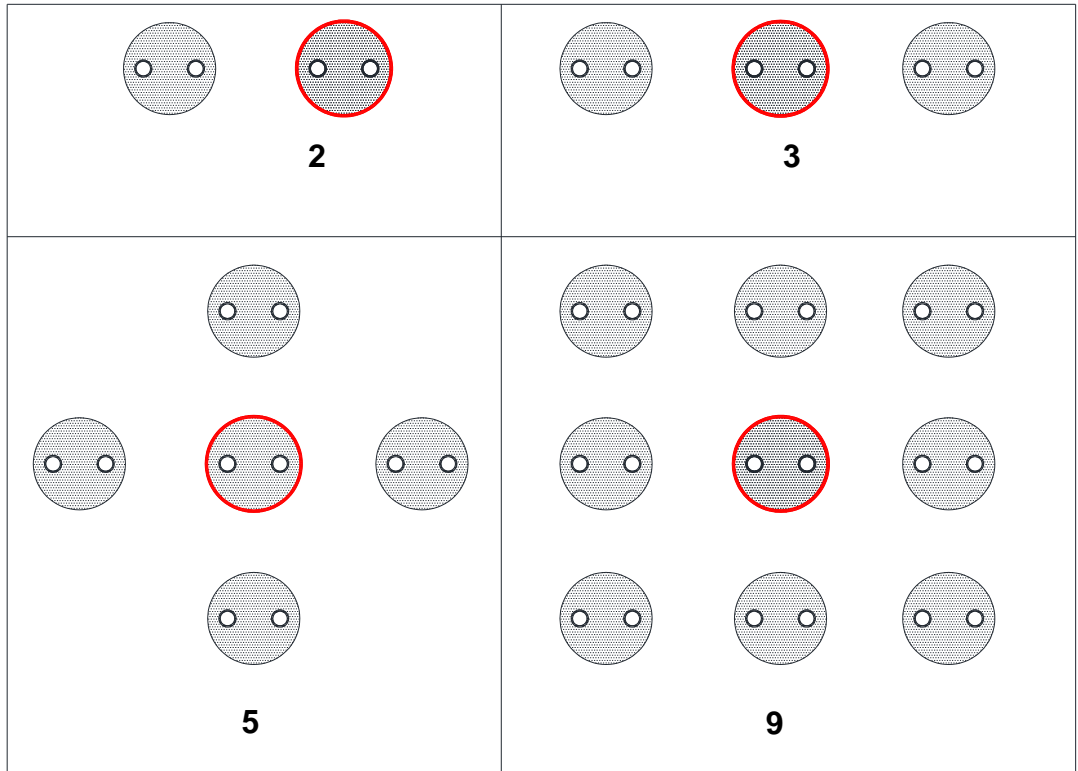
3.5 Kuyular Arası Mesafenin Etkisi (KAMET)

Isı ihtiyacının yüksek olduğu geniş ölçekli uygulamalarda birden fazla kuyu açılması ve bunların belirli bir alan içerisinde dağılımının yapılması gerekmektedir. Kuyular, çalışmaya başladıktan sonra çevresindeki toprağın sıcaklığını değiştirmekte ve çalışmaya devam etmesiyle zamanla ısı olarak etkilenen toprak parçası artmaktadır. Kuyuların birbirine yakın olması durumunda kuyular arasındaki etkileşim bir süreden sonra kaçınılmaz olmaktadır. Kuyuların etkileşim süresi toprağın efektif ısı iletim

katsayısı, kullanım süresi, ısı yükü vb. parametrelere bağlıdır. Kuyuların etkileşimi ile performans kaybı ortaya çıkmaktadır. Performans kayıplarının önüne geçebilmek için kuyular arasındaki ideal uzaklığın bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla kuyular arası mesafe incelemesi matematiksel modelleme (*Comsol*) ile incelenmiştir. Uygulamada karşılaşılabilecek farklı kuyu dizilimleri denenerek ısı kaybı incelemeleri yapılmıştır. Bu bölümdeki bilgiler ([Gultekin vd., 2015](#)) çalışmasında da verilmiştir.

3.5.1 Çoklu kuyu modelleme

Şekil 3.28’de her biri tek U-borusu içeren ve toplamda 2, 3, 5 ve 9 kuyudan oluşan kuyu dizilimleri ele alınmıştır.

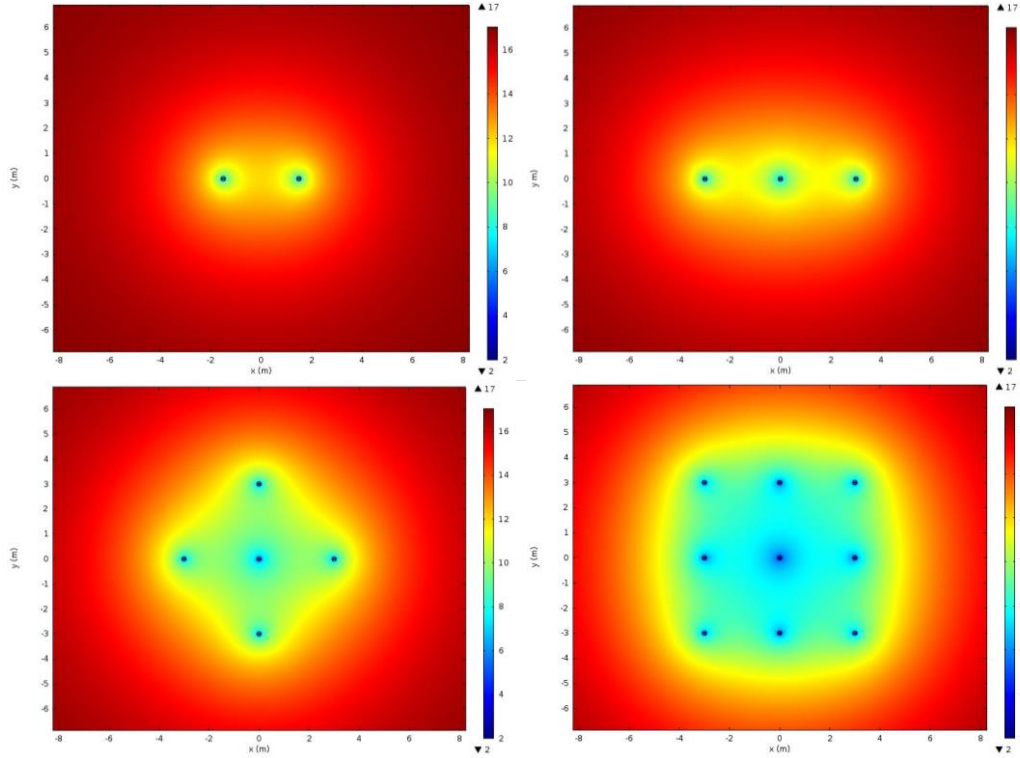


Şekil 3.28 : Çeşitli kuyu dizilimleri, (çeperi kırmızı olanlar kritik kuyular).

Isıtma modunu temsil etmesi için gidiş suyu sıcaklığı 2 °C, debi ise 16 l/dk olarak seçilmiştir. Bu dizilimlerde performans kaybının en yüksek olduğu kuyu incelemeye alacağımız kritik kuyudur. Kritik kuyular, 2 kuyulu tasarımda 2 kuyudan herhangi birisi, 3, 5 ve 9 kuyulu dizilimlerde ortadaki kuyulardır. Hesaplamalar 0.5 m ile 15 m arasında değişen mesafeler için yapılmıştır.

3.5.2 Modelleme sonuçları

Kuyular arasında 3 m aralık bulunması durumunda 2400 saatlik kesintisiz çalışmadan sonra kuyular etrafındaki sıcaklık dağılımları Şekil 3.29’da verilmiştir. Beklenildiği gibi ısıl etkileşimlerin ve sıcaklık düşümünün büyüklüğü kuyu sayısının artması ile artmıştır. En önemli sıcaklık düşümü de kritik kuyular etrafında gerçekleşmiştir.

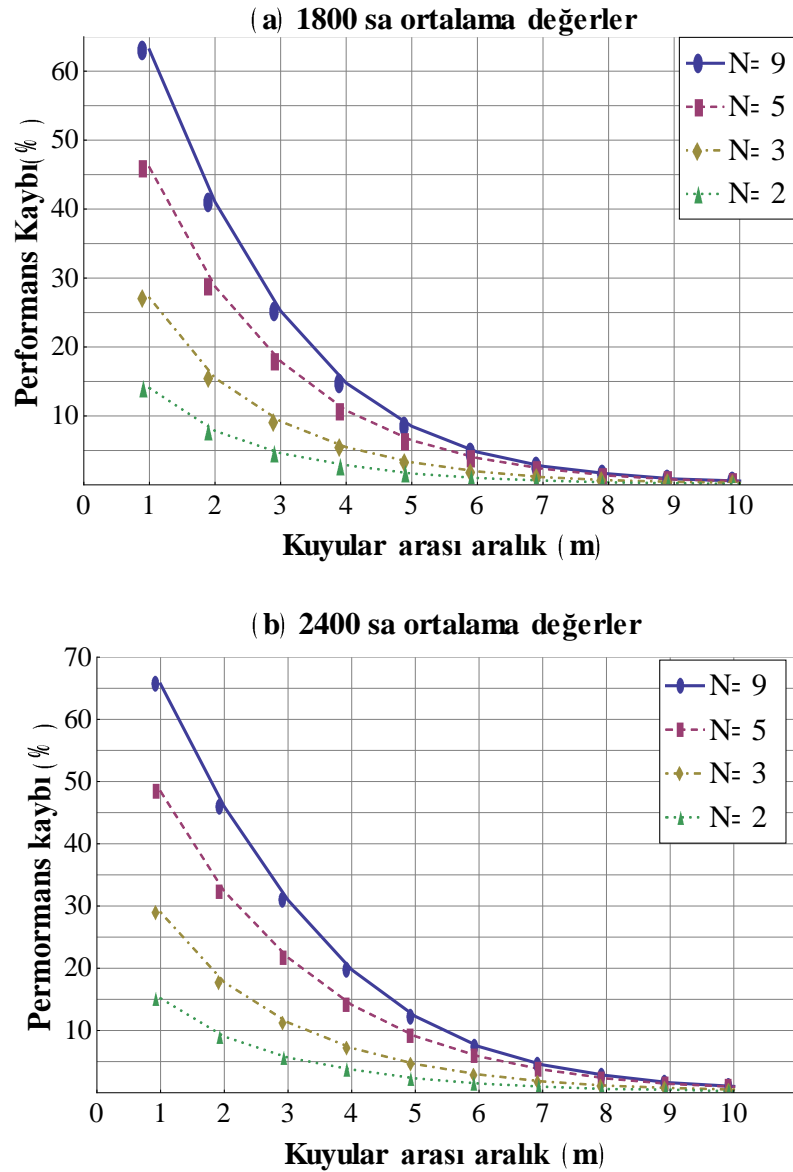


Şekil 3.29 : Kuyular arasında 3 m aralık bulunması durumunda farklı kuyu dizilimleri için 2400 saat sonunda ortaya çıkan sıcaklık dağılımları.

Şekil 3.30, kritik kuyuların aralarındaki mesafeye bağlı performans kayıplarını 1800 sa ve 2400 sa kesintisiz çalışma durumları için göstermektedir. Ortalama akışkan sıcaklığı 2 °C iken bir kuyunun ısı yükü 1800 sa ve 2400 sa için sırasıyla 42.7 W/m ve 41.8 W/m dir. Çoklu kuyular kullanıldığında ısıl etkileşimlerden dolayı kritik kuyunun ısı yükü düşmektedir. Bu nedenle diğer kuyulardan dolayı Performans Kaybı (PK) tek kuyu (TK) ve kritik kuyu (KK) ısı yükleri kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$PK = 1 - \frac{\bar{q}'_{KK}}{\bar{q}'_{TK}} \quad (3.8)$$

Burada \bar{q}'_{KK} ve \bar{q}'_{TK} sırasıyla KK ve TK'nın verilen çalışma süreleri için ısı yüklerini göstermektedir. Şekil 3.30'da görüldüğü gibi KK'nun performans kaybı kuyu aralığının artması ile eksponensiyel olarak düşmektedir.



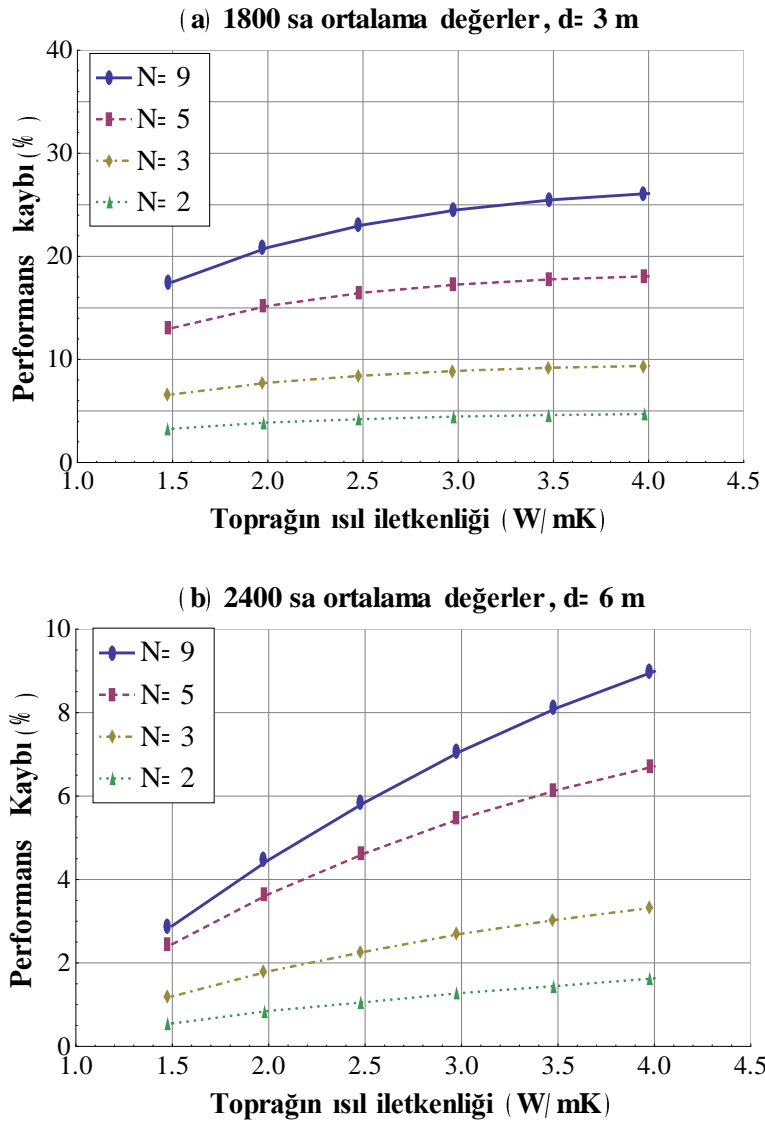
Şekil 3.30 : 1800 saat ve 2400 saat kesintisiz çalışma koşulları için kuyu aralığına bağlı olarak KK'lardaki performans kaybının değişimi.

Denklem (3.8) KK için tanımlandığından bir kuyu tarlasındaki maksimum performans düşümünü göstermektedir. Bu nedenle Şekil 3.30'da verilen analiz, tasarım mühendisine optimum kuyu aralığını seçmede yardımcı olacaktır. Optimizasyon sırasında, uygulama alanı sınırlı değilse kabul edilebilir performans kayıpları seçebilir

ve kuyu aralıklarına karar verebilir. Sınırlı bir alan olması durumunda yeterli kuyu aralıkları seçilerek hesaplamalarda meydana gelecek kayıplar da ilave edilir. Kuyu uygulama alanını azaltmak için kısa kuyu aralıkları seçilirken maliyeti düşürmek için kuyu aralıkları arttırılmalıdır.

Burada düşünülen dizilimlerde KK için bile performans kaybı 6 m aralık için %10'dan azdır. Eğer kuyu aralıkları 10 m seçilirse 2400 saat çalışma koşulu için bile ısı etkileşimleri ve performans kayıpları ihmal edilebilecek (%1'den az) seviyededir.

Toprağın ısı iletkenliğinin performans kaybına etkisini incelemek için sayısal hesaplamalar 1.5-4 W/(mK) aralığı için tekrarlanmıştır. Şekil 3.31, KK'daki performans kaybının ısı iletkenlik ile değişimini göstermektedir.



Şekil 3.31 : KK'nun ısı iletkenlik ile performans kaybının değişimi a) 3 m aralıklı 1800 saat çalışma durumu, b) 6 m aralıklı 2400 saat çalışma durumu.

Görüldüğü gibi performans kaybındaki bağıl kayıp geniş aralık için yüksek iken performans kaybı ve değişimi önemli seviyelerde değildir. Performans kaybındaki bağıl kayıp artan kuyu sayısı ile artmaktadır. 3m aralıklı kuyu dizilimlerinde, 1800 saat kesintisiz çalışmada toprak ısı iletkenliğinde %100 artışında yani 2 W/(mK) den 4 W/(mK) çıkması durumunda performans kayıplarındaki bağıl değişimler N=9 ve N=2 için sırasıyla %25 ve %21'dir (Şekil 3.31a). Bu değerler kuyu aralıkları 6 m olması ve 2400 saat kesintisiz çalışması durumunda %200 ve %92'dir (Şekil 3.31b).

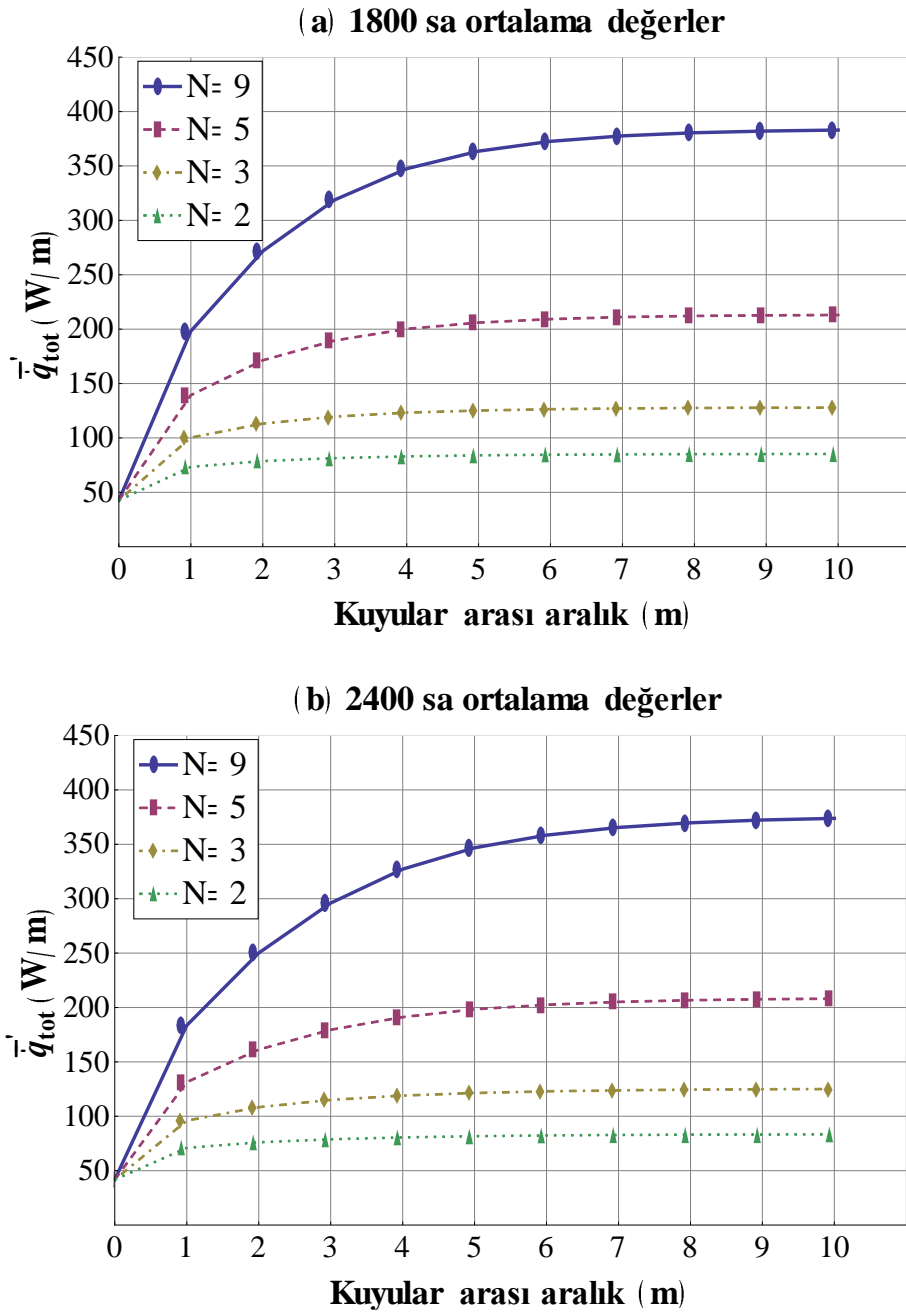
KK'nun performans kaybı kuyu aralığını belirlemek için önemli ve belirleyici bir parametre olmasına rağmen kuyu alanının toplam ısı yükü en önemli tasarım parametrelerinden biridir. Bu nedenle toplam ısı yükünün farklı kuyu aralıkları ve çalışma süreleri için hesaplanması ve araştırılması önemlidir.

Şekil 3.32 bir kuyu tarlasının toplam ısı yükünün, farklı kuyu aralıkları, farklı dizilimler ve çalışma süreleri için değişimlerini göstermektedir. Buradan toplam ısı yükünün, ısı etkileşimlerinin azalması nedeniyle kuyu aralıklarının artması ile arttığı görülmektedir. Kuyu aralıkları sonsuza gittiğinde her kuyu TK gibi davranmaktadır. Böylece toplam ısı yükü \bar{q}'_{TK} değerinin kuyu sayısı ile çarpımı ile bulunur. Diğer taraftan kuyu aralıkları sıfıra giderse tüm kuyular bir kuyu gibi davranır. Böylece toplam ısı yükü \bar{q}'_{TK} 'a gider. Kuyu aralığının sıfıra gitmesi durumunda tüm kuyu tarlasındaki ısı yükünün tek kuyu gibi davranacağı ve kuyu aralığının sonsuza gitmesi durumunda etkileşimin minimuma düşerek her bir kuyunun toplamının kuyu tarlasındaki ısı yüküne eşit olacağı ifadesi üssel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{q}'_{toplamlam} = \sum_{i=1}^N \bar{q}'_i = \bar{q}'_{TK} N \left[1 - \frac{N-1}{N} \exp(-d/\delta) \right] \quad (3.9)$$

Burada N kuyu sayısı, d kuyular arası aralık ve δ ise kuyu yerleştirmelerine, çalışma süresine ve toprağın ısı özelliklerine bağlı olan *ısı etkileşim katsayısıdır*. Bu denklemde kuyu aralığı sıfıra giderken $\bar{q}'_{toplamlam} = \bar{q}'_{TK}$ olmakta kuyu aralığı sonsuza giderken ise $\bar{q}'_{toplamlam} = \bar{q}'_{TK} N$ olmaktadır. δ 'nın değerlerini belirlemek için (3.9) numaralı denklem Şekil 3.32'de verildiği gibi sayısal sonuçlarla örtüştürülmüştür. Şekilde işaretçiler sayısal sonuçları eğriler ise denklem (3.9) ile karşılaştırma işleminden sonraki sonuçları göstermektedir. Elde edilen δ değerleri için denklem (3.9) ile MAPE değeri

Çizelge 3.19’da verilmiştir. Görüldüğü gibi MAPE değeri %3’te azdır ve denklem (3.9) kuyu tarlasının davranışını temsil etmektedir.



Şekil 3.32 : Toplam birim ısı yükünün kuyu aralığı ve çalışma süresi ile değişimi
a)1800 sa, b) 2400 sa.

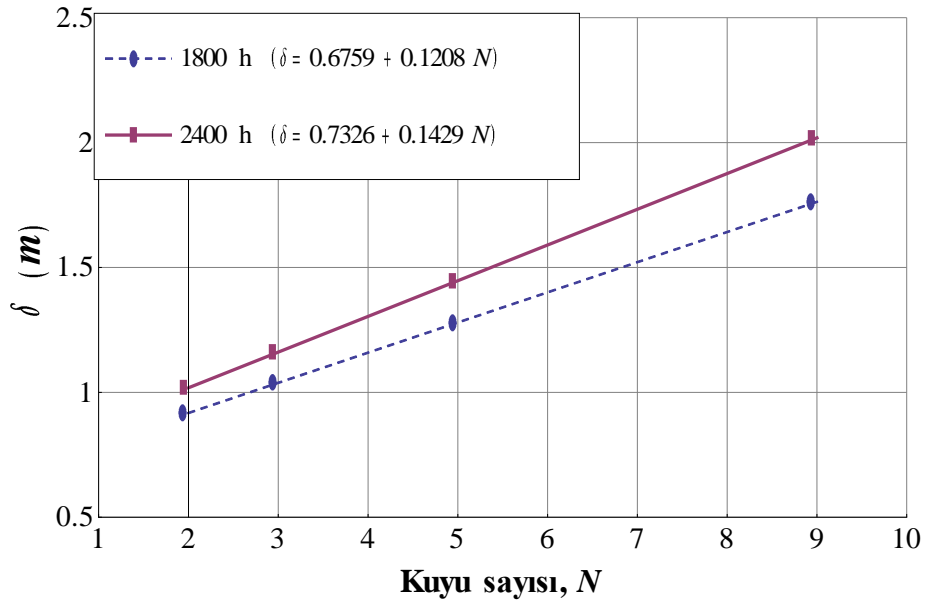
δ her kuyu için ısıl etkileşimin gücünü temsil ettiğinden değeri artan kuyu sayısı (N) ile artmaktadır. Değeri aynı zamanda kuyuların geometrisine de bağlıdır. Diğer bir deyişle δ değeri 4x4 ve 2x8 gibi farklı kuyu yerleşimleri için farklı değerler almaktadır.

Şekil 3.33'te görüldüğü gibi δ değeri farklı çalışma süreleri için N sayısına doğrusal olarak bağlıdır. Kare ve dairesel işaretçiler sayısal sonuçları temsil ederken sürekli çizgiler çakıştırılmış doğrusal fonksiyonları temsil etmektedir.

Çizelge 3.19 : Farklı kuyu sayıları ve çalışma süreleri için ısı etkileşim katsayısı ve MAPE değerleri.

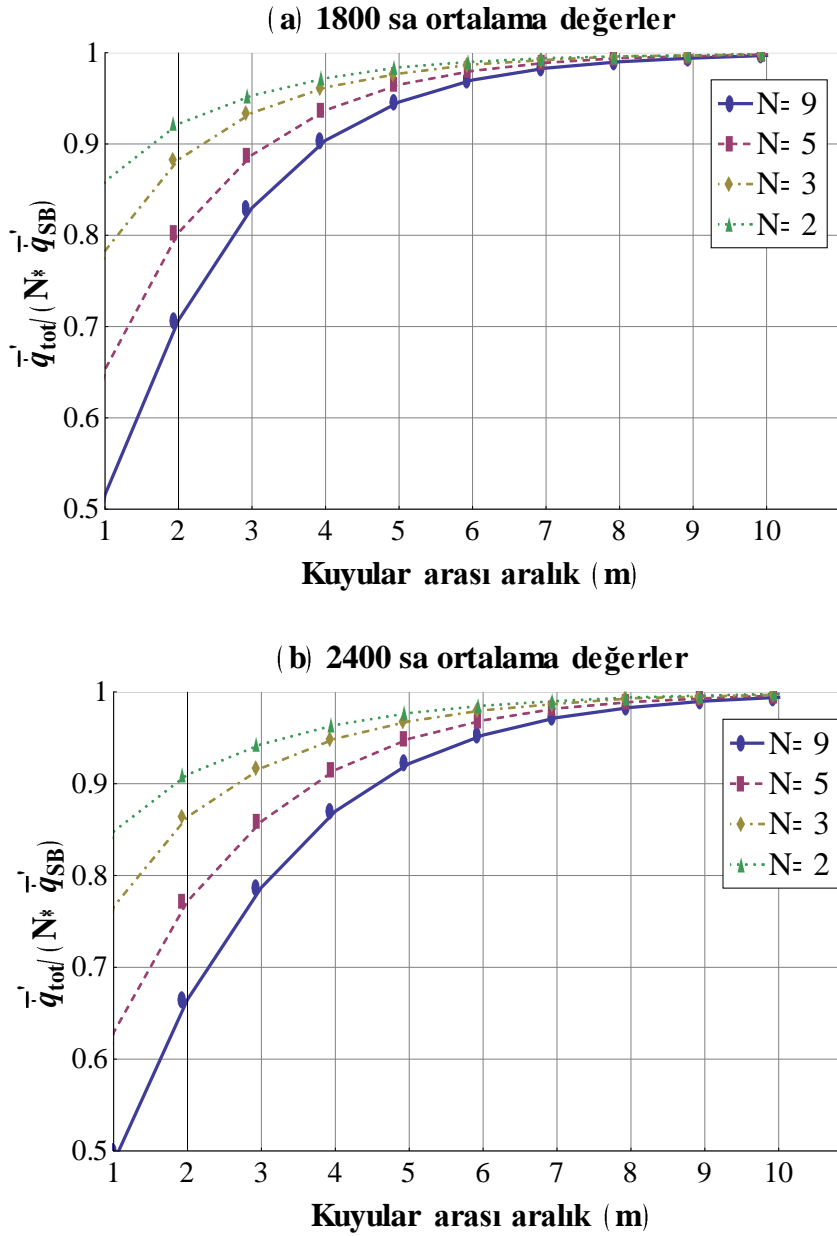
Kuyu Sayısı (N)	1800 saat		2400 saat	
	δ (m)	Denk. (3.9) MAPE (%)	δ (m)	Denk. (3.9) MAPE (%)
2	0.92	1.8	1.02	2.2
3	1.04	2.2	1.16	2.8
5	1.28	2.2	1.45	2.9
9	1.76	1.3	2.02	2.1

δ 'nın N sayısına olan bu doğrusal bağıntısı küçük N sayıları ile sınırlı olması beklenmektedir. Büyük N sayılarında uzak kuyular arasında ısı etkileşim zayıf olduğu için asimptotik bir δ bağıntısı beklenmektedir.



Şekil 3.33 : Isıl etkileşim katsayısı δ 'nın N sayısı ile değişimi.

Şekil 3.34, farklı aralıklar ve çalışma süreleri için her bir kuyunun boyutsuz ısı yükü değerlerinin değişimini göstermektedir. Kuyu sayısının artması ile ısı etkileşimlerin artacağı için birim kuyu için ısı yükünün düştüğü açık olarak görülmektedir. Bu davranış aynı zamanda Şekil 3.33'te görüldüğü gibi δ 'nın N sayısı bağlı artışı ile de öngörülebilir.



Şekil 3.34 : Kuyu aralığının birim kuyudaki ısı yüküne etkisi a)1800 sa, b) 2400 sa.

3.5.3 Kuyular arası mesafenin etkisi incelemesinden elde edilen sonuçlar

DeneySEL olarak doğrulanmış model çoklu kuyu alanlarındaki performans kayıplarını araştırmak için kullanılmıştır. Kritik kuyuların performans kayıpları farklı kuyu dizilimleri ve çalışma sürelerinde aralıklara bağlı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada göz önüne alınan en kötü senaryo olan 2400 saat kesintisiz çalışma için kuyular arasında 6 m aralık bırakmak kritik kuyudaki performans kaybının %10'un altında olmasını sağlar. Toprak ısıl iletkenlik değerinin 2 W/(mK)'den 4 W/(mK)'e çıkması bile sonucu değiştirmez.

Ayrıca kuyudaki toplam ısı yükü için analitik bir ifade önerilmiştir. Bu ifade kuyu aralığı ve kuyu sayılarına bağlı olarak mühendislik planlama süreçlerinde kuyu alanının mühendislik tasarımı aşamalarında kullanılabilir. Küçük kuyu sayılarında her kuyu için toplam ısı etkileşim kuyu sayısının artması ile artar, birim ısı yükü ise düşer. Kesintisiz çalışma durumlarında bile çalışma süresinde %25 artış uzun aralıklı (9, 10 m) ve kısa aralıklı (1, 2 m) tasarımlarda bir kuyunun toplam ısı yükünde sadece sırasıyla %2 ve %7 değişime neden olur. Verilmiş kuyu adedi için kuyuların olabildiğince anizometrik bir geometri ile yerleştirilmesi karşılıklı ısı etkileşimlerin en düşük değerlerine düşmesi nedeniyle en iyi seçenek olmaktadır. Diğer bir deyişle verilmiş N kuyu sayısı için dikdörtgen $1 \times N$ yerleştirmesi kare olanından ($\sqrt{N} \times \sqrt{N}$) daha iyi ısı yüküne sahiptir.

3.6 Akış Hızının Birim Isı Transferi Değerine Etkisi (AHET)

Akış hızının (hacimsel debinin) birim ısı transferi değerine etkisini incelemek amacıyla aynı kuyuda farklı debilerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Toprağa gidiş suyu sıcaklığı test boyunca 40 °C sıcaklıkta sabit tutulmak üzere akış debisi 0.149 l/s, 0.265 l/s ve 0.447 l/s olacak şekilde her bir debi değeri için farklı testler yapılmıştır. Testler 10 Eylül ve 8 Kasım tarihleri arasında farklı zamanlarda ve her biri 120 saat olacak şekilde yapılmıştır. Test sonuçlarında elde edilen birim ısı transferinin değişimi Şekil 3.35'te verilmiştir.

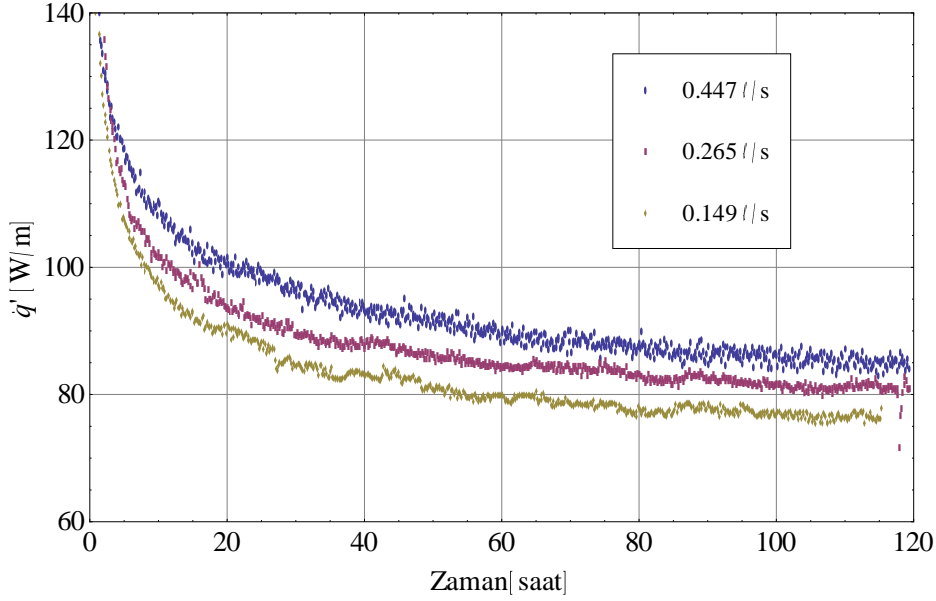
12 saatlik rejime geçme süresinden sonraki test sonuçlarından elde edilen ortalama çıkış sıcaklıkları, birim ısı transferi değerleri ve 35 °C 'de suyun yoğunluğu 994.1 kg/m³ ve dinamik viskozitesi 0.00072 kg/(ms) olmak üzere *Reynolds* sayıları Çizelge 3.20'de verilmiştir.

Çizelgeden de görülebileceği gibi 50 m'lik kuyuda hacimsel debide üç kat artış birim ısı transferi değerinde %12 artış sağlamıştır. Hacimsel debide (veya akış hızında) gerçekleşen artış, sıcaklık farkını ve akışkanın kuyu içerisindeki dolaşım süresini azaltmaktadır. Böylece ısı kısa devre azalmakta ve birim ısı transferi artmaktadır. Diğer taraftan yüksek akış debileri daha fazla hidrolik güç gerektirmekte ve elektrik enerjisi tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle akış hızının belirlenmesi tasarımcının tüm sistemi eniyileme yöntemi ile belirleyeceği bir problemdir.

Pompadan çekilen elektrik gücü aşağıdaki denklemle (Çengel ve Cimbala, 2008) ifade edilebilir:

$$\dot{W}_{elektrik} = \frac{\rho \dot{V} g h_{k,pompa}}{\eta_{pompa-motor}} \quad (3.10)$$

burada ρ akışkan yoğunluğunu, \dot{V} hacimsel debiyi, $h_{k,pompa}$ pompa yükünü, η pompa-motor verimini göstermektedir.



Şekil 3.35 : Farklı akış hızlarında elde edilmiş deney sonuçları.

Pompa yükü ise basma yüksekliği ile tesisattaki yük kayıplarını içermektedir.

$$h_{k,pompa} = \Delta z + h_k \quad (3.11)$$

h_k tesisattaki yük kayıplarını temsil etmektedir. Şekil 3.36'da verilen kuyu kesitinden de görülebileceği gibi kullanılan sistemde basma yüksekliği olmadığı için sadece tesisattaki yük kayıpları vardır.

Çizelge 3.20 : Çalışma parametreleri ve farklı akış hızları için elde edilen sonuçlar.

Kuyu No	Hacimsel Debi [l/s]	Akış Hızı [m/s]	Re	T_g [°C]	T_d [°C]	\bar{q}' [W/m²]	Fark [%]
1	0.149	0.268	9694	40.0	33.5	80.9	0
1	0.265	0.477	17255	40.0	36.1	85.6	5.8
1	0.447	0.804	29084	40.0	37.5	90.6	11.9

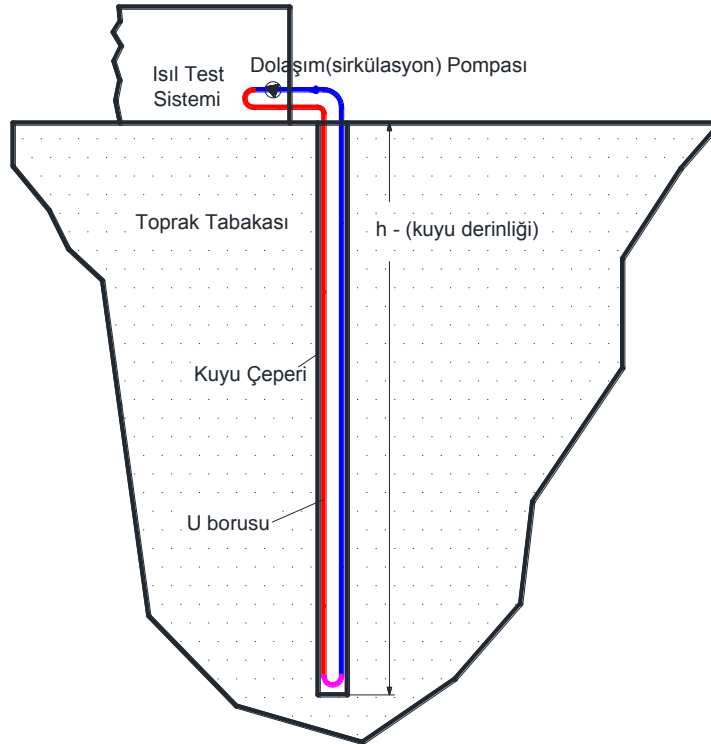
Yük kayıpları artan debi ile artmaktadır ve aşağıda verilen formüle göre hesaplanabilir (Çengel ve Cimbala, 2008):

$$h_{k,toplam} = \frac{v^2}{2g} \left(f \frac{l}{D_{b,i}} + \sum K_K \right) \quad (3.12)$$

Burada v akış hızı, l boru uzunluğu, $D_{b,i}$ boru iç çapı, K_K boru tesisatındaki toplam kayıplardır ve kataloglardan alınabilir. f ise sürtünme faktörüdür ve *Colebrook* bağıntısı ile aşağıdaki şekilde bulunabilir (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.13)$$

ε/D bağıl pürüzlülük katsayısıdır ve üretici kataloglarından alınabilir.



Şekil 3.36 : Kuyu kesit görüntüsü.

Akış debisinin hız ve kesit alanının çarpımı olduğunu ($\dot{V} = vA_{boru}$) göz önüne alarak (3.12) denklemini (3.10) denklemi içerisine yerleştirdiğimizde

$$\dot{W}_{elektrik} = \frac{\rho v^3 A_{boru}}{2\eta_{pompa-motor}} \left(f \frac{l}{D_{b,i}} + \sum K_k \right) \quad (3.14)$$

bulunur. (3.14) denkleminde çekilen elektrik gücünün hızın küpü ile orantılı olduğu görülmektedir. Fakat (3.13) denklemindeki sürtünme faktörü f terimi de Re sayısını ve dolayısıyla hız değerini içermektedir. Fakat (3.14) numaralı denklem içerisine f doğrudan bir çarpan olarak girmediğinden etkisi küçüktür. Buna bağlı olarak *çekilen elektrik gücü hızın küpüne yakın oranlarda artış gösterecektir.*

Bu sonuçlara dayanarak boru içerisindeki hız pompa özelliklerine bağlı olarak belli bir seviyeye kadar arttırılabilmektedir. Fakat kuyunun ısı transferinde yaklaşık % 6'lık bir artış için akış hızını 2 kat arttırmak gerekmekte ve bu da pompa sarfiyatının yaklaşık 8 kat arttıracağından çok anlamlı olmayacaktır.

3.7 Kuyudaki Isı Transferini Arttırmaya Yönelik Çalışmaların Sonuçları

Bu bölümde kuyu içerisindeki ısı transferini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Kuyu maliyetlerini oldukça arttırması nedeniyle kuyu çapının arttırılması olumsuz etkiye neden olmaktadır. Boru çapını ve borular arası mesafeyi arttırmak yerine U borusu sayısını arttırmak daha verimli olmaktadır. Bölüm 3.3'de verildiği gibi 2U borusu kullanmak %20, 3U borusu kullanmak %38 civarında performans artışı sağlamakta ve çift U kullanılan boru sistemi *Türkiye* koşullarında şu an için en iyi performans-maliyet seçeneğini sunmaktadır.

Elde edilen bu sonuçlara göre, *basınç kayıplarını çok arttırmayacak çapta boru seçilmesi (örn: Ø32 - 40) çift U borusu kullanılması ve olabilecek en düşük çapta kuyu açılması ve boruların çepere yakın tutulması performans-maliyet açısından en iyi çözümü vermektedir.*

4. YATAY TOPRAK ALTI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE PERFORMANS GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

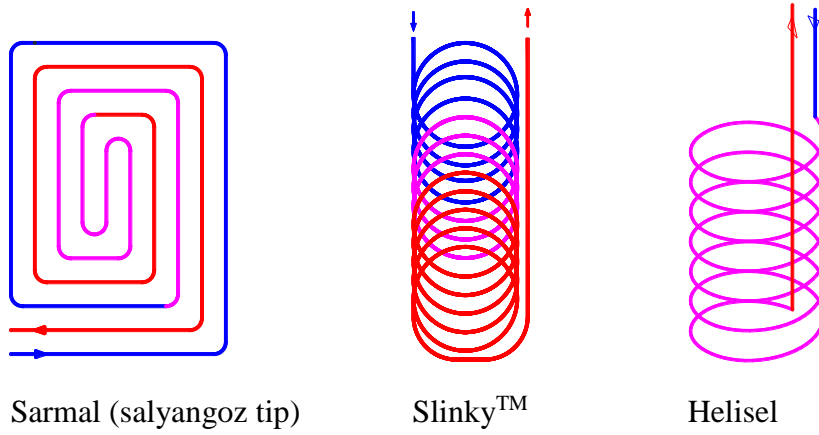
Düşey toprak ısı değıştiricileri (ısıtma kuyuları), diğer giderlere kıyasla pahalı olan sondaj işlemleri gerektirdiğinden maliyetleri yüksek olmaktadır. Bu nedenle daha az maliyetli ve uygulaması daha kolay olan sığ toprak içeresine boruların yerleştirildiği uygulamalar da yapılmaktadır. Bu uygulamalar *yatay ısı değıştiricileri*, *serme uygulamaları* olarak da isimlendirilmektedir. Bu tip uygulamalarda borular çok derin olmayacak şekilde (sığ) toprak içeresine yerleştirilir. Bugüne kadar toprak altına yapılan sığ borulama tiplerini belli başlıklarda isimlendirebiliriz. Bunlar, Şekil 4.1'den görülebileceği gibi başlıca *sarmal (salyangoz tip)*, *slinkyTM* ve *heliselden* oluşmaktadır²⁰. Sarmal tip sadece yatay olarak belirli bir derinliğe yerleştirilebilirken, slinky ve helisel ısı değıştiricileri hem yatay hem de düşey olarak uygulanabilir. Bu tiplerin hangi yönlerden öne çıktığı hangisinin avantajlı olduğu uygulamacı ve son kullanıcı açısından oldukça önemli bir konudur. Bu bölümde bu tipler arasında performans, işgal ettiği alan, maliyeti yönünden karşılaştırmaları deneysel ölçümlere dayalı olarak yapılmıştır.

Yatay tip sığ uygulamalarda boruların yerleştirme derinliği ısı değıştiricinin performansı açısından hayati bir öneme sahiptir. Isıtma amaçlı kullanımda kış aylarında don vb. olaylardan etkilenmeyecek kadar derin ve yazın toprağın kendini yenilemesi için güneşle yenilenebilecek kadar sığ olması gerekmektedir. Ayrıca uygulama derinliği bölgenin ısıtma ve soğutma süresi ve güneşlenme süresi ile alakalıdır. Genelde uygulanan gömme derinliği 1.2 m ile 2 m arasında değişmektedir (Egg ve Howard, 2011).

En iyi gömme derinliğini bulmak için Şekil 3.27'de verilen yıllık sıcaklık değişimi grafiği kullanılmıştır. Bu grafik *İstanbul* civarındaki toprak sıcaklığının aylara bağlı olarak değişimlerini vermektedir.

²⁰ Literatürde çok farklı isimlendirmeler kullanılmaktadır. Sarmal için: lineer, helisel için :coil, spiral coil vb. de kullanılmaktadır. Heliseli kendi haline bırakıp yatırıldığında slinky ortaya çıktığı için Slinky için yatık helis de kullanılabilir.

Grafikten görülebileceği gibi 1 m, 2 m ve 3 m derinlikte yılın en yüksek ve en düşük sıcaklıkları arasında fark sırasıyla 13 °C, 6 °C ve 4 °C dir. Bu grafikten elde edilen diğer bir sonuç ise mevsimsel sıcaklık değişimlerinin ancak 6-7 m derinliğe kadar etkili olduğudur. 2m derinlikteki en düşük sıcaklık Şubat, Mart aylarında 12.5 °C olarak, en yüksek sıcaklık ise Ağustos, Eylül aylarında 20 °C olarak görülmüştür. Bu sıcaklıklar ısı pompasından -4/0 °C aralığında akışkanın toprağa gönderildiği kış ayı ve hava sıcaklıklarının ortalama 30 °C olduğu ve toprağa 30/40 °C akışkanın gönderildiği yaz ayları için kabul edilebilir sıcaklıklardır.



Şekil 4.1 : Sığ toprak ısı değiştirici tipleri.

İstanbul bölgesi için ısıtma sezonu *Ekim* ayının ortasında başlayıp *Nisan* ayına kadar devam etmektedir. Soğutma yapılmayıp toprak boşa bırakılsa bile *Nisan* ayından *Kasım* ayına kadar 6 aylık bir güneşlenme ve toprağın kendini yenileme süresi vardır. Eğer ısıtma ve soğutma beraber çalıştırılacaksa kışın çekilen ısı yerine yazın ısı basılacağı için toprağın, boru gömülen tabakalarında ilerleyen yıllar boyunca anlamlı bir sıcaklık düşümü veya artması yaşanmayacaktır.

4.1 Deneysel Ölçümler

Yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı, boruların yerleştirilmesi için toprak hafriyat maliyeti de göz önüne alınarak 2 m derinlik en uygun derinlik olarak kabul edilmiştir. Sarmal ve yatay slinky 2 m derinliğe yerleştirilmiş, dikey slinky ise 1.8 m ile 2.6 m arasında yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Benzer şekilde helisel ısı değiştiricisi (Rehau, 2011) ise yüzeyden itibaren başlangıç ve bitiş derinliği olarak 1.5 m-4.5 m arasında yerleştirilmiştir (Şekil 4.3).



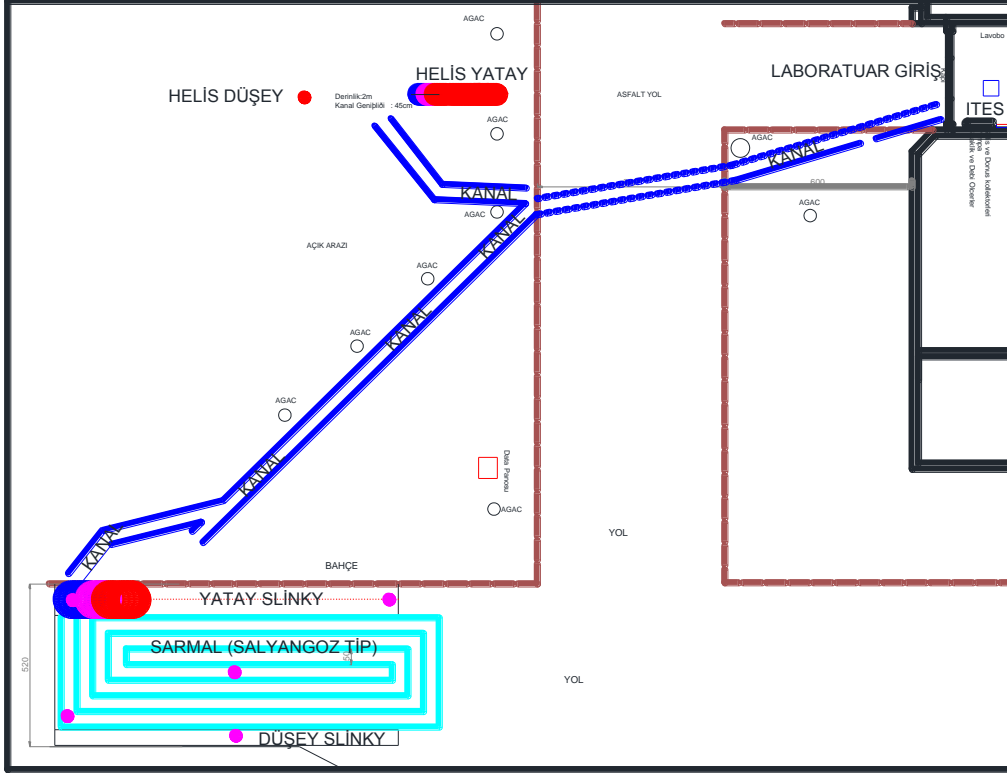
Şekil 4.2 : Sarmal, yatay ve düşey slinky ısı değiştiricisi uygulamaları.

Uçları dışarıda kalan borular 0.5m derinlikte açılan kanal içerisinde bulunan test sistemine bağlanmıştır (Şekil 4.4). Serme alanı ile laboratuvar arasındaki borular elastomerik yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır.



Şekil 4.3 : Düşey helisel tipi ısı değiştiricisi uygulaması.

Tüm bağlantılar yapıldıktan sonra ve kanallar kapatılmadan önce basınçlı su ile tüm borular test edilmiş ve birkaç gün basınçlı su dolu halde bırakılmıştır. Sonra boruların üzeri ilk olarak elekten geçirilmiş ince toprakla 1-2cm kaplanmış daha sonra ise aynı kanaldan çıkan toprak ile eski haline gelecek şekilde kapatılmıştır. Isı değiştiricileri bölüm 2.4’te detayları verilen Isıl Test Sistemi ile test edilmiştir.



Şekil 4.4 : Serme alanı yerleşim planı.

Serme alanında kullanılan boruların özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Yatay uygulamaların özellikleri.

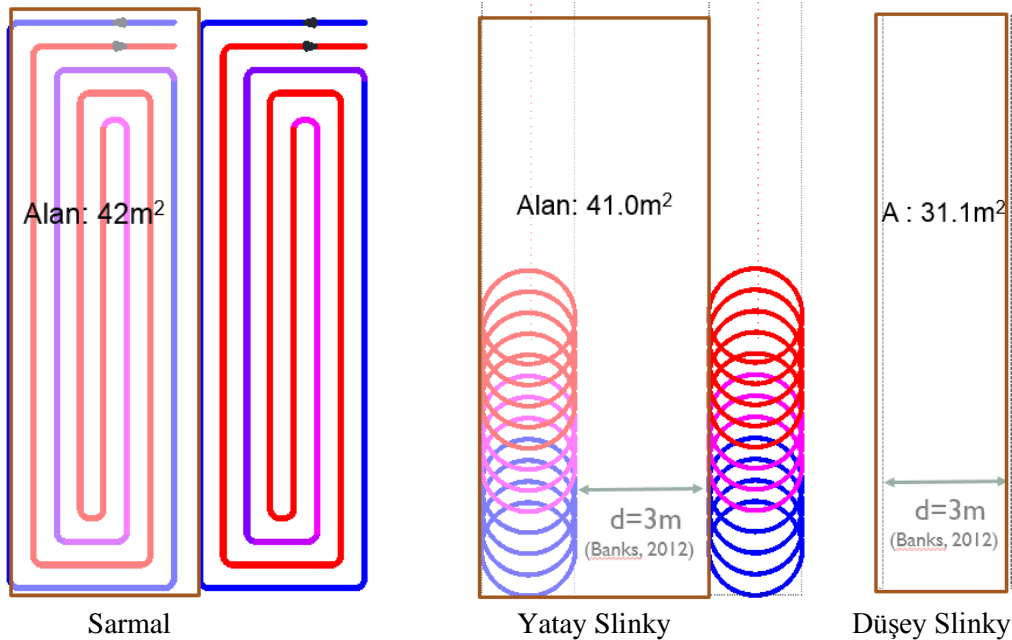
		Sarmal	Slinky Yatay	Slinky Düşey
Toplam boru uzunluğu	m	100	100	100
Boru malzemesi		HDPE	HDPE	HDPE
Boru iç çapı	mm	26.2	26.2	26.2
Boru dış çapı	mm	32.0	32.0	32.0
Serme derinliği	m	2	2	1.8-2.6

4.2 Test Sonuçları

Helisel tip ısı değiştiricisi uygulama derinlikleri, boru özellikleri vb. farklılıkları olduğundan karşılaştırmalarda diğerlerinden ayrı tutulmuş olup sonuçları bu bölümün

sonundaki karşılaştırmalarda verilecektir. Testler birim ısı transferi değerleri göz önüne alınacağı için sabit sıcaklıkta yapılmış ve aynı sıcaklık ve debide elde edilen değerler üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Düşey uygulamalarla benzerlik olması açısından seçilen test sıcaklığı ısı pompası test sıcaklıklarına en yakın olan 40 °C olarak seçilmiştir. Güvenilir sonuçlar almak için testler yapıldıktan uzun bir süre sonra ikinci bir doğrulama testi yapılmış ve benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Her tip için gerekli alan, debi, gidiş akışkan sıcaklığı ve elde edilen test sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Uygulama alanı hesaplamasında sarmal (salyangoz tip ısı değiştiricisi için) herhangi bir ilave aralık düşünmeden doğrudan işgal ettiği alan yazılmıştır. Örnek olarak sarmal tip serme uygulanması düşünülen bir alanda serme boruları arasındaki açıklık yeterli geldiğinden farklı ısı değiştiricisi hatları arasında ilaveten aralık bırakmaya gerek yoktur. Fakat slinky tipi uygulamada bir slinky hattı ile diğeri arasında en az 3m aralık bırakılmalıdır. (Banks, 2012). Bu nedenle slinky hesaplamalarında gerekli alan hesaplanırken bu aralık ta hesaba katılmıştır. Yatay slinky nin uygulama alanı $10 \times 1.1 = 11 \text{ m}^2$ ve bırakılması gereken boşluk $10 \times 3 = 30 \text{ m}^2$, ve toplam gereken alana $11 + 30 = 41 \text{ m}^2$ olmaktadır. Benzer şekilde düşey slinky için gereken alan $1.1 + 30 = 31.1 \text{ m}^2$ olarak bulunmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : 100m'lik farklı yatay TID'leri için gerekli alanlar.

Çizelge 4.2: Yatay tip ısı değıştircileri test sonuçları.

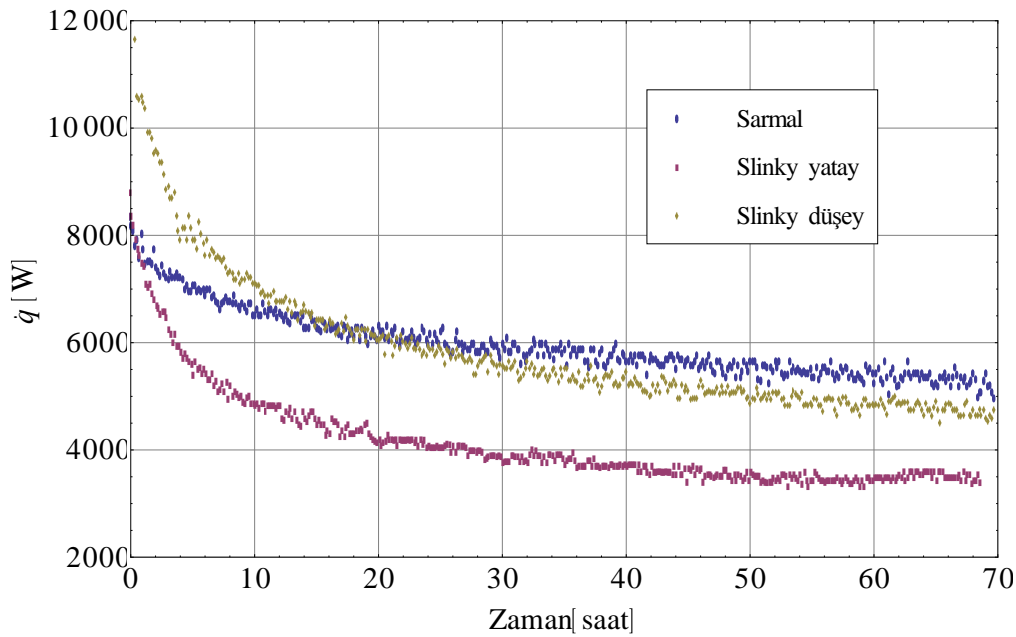
Serme Tipi	Gerekli Alan	Debi	T_g	T_d	\bar{q}	$\bar{q}_{12-70sa}$
	m ²	l/dk	°C	°C	W	W
Slinky Yatay	41.0	16	40	36.4	4161	3810
Slinky Düşey	31.1	16	40	35.0	5882	5374
Sarmal	42.0	16	40	34.6	5971	5748

Herbir ısı değıştircisindeki ısı yükü denklem (4.1) ile hesaplanarak test süresince değışimi Şekil 4.6’da verilmiştir.

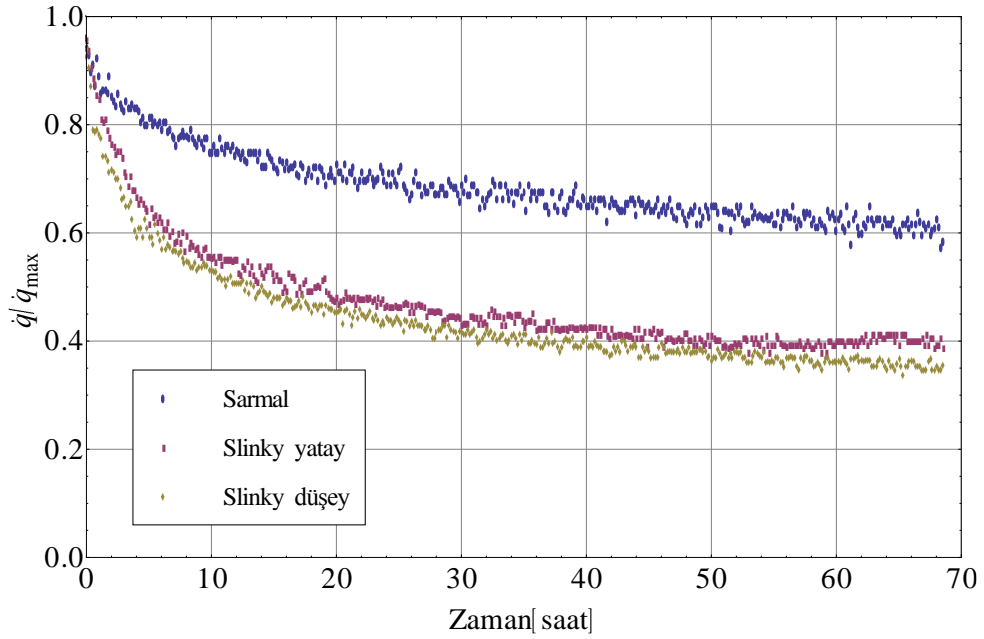
$$\dot{q} = \dot{m}c_p(T_g - T_d) \quad (4.1)$$

Düşey slinky’nin en yüksek ısı yükü ile başladığı daha sonra yatay olanı ile aynı oranda azaldığı görülmektedir. Sarmal tip ısı değıştircisi ise daha düşük ısı yükü ile başlamasına rağmen azalış eğilimi diğerlerinden daha azdır. Özellikle 20. saatten sonra sarmal tipin ısı yükü en yüksek değerde olmuş daha sonra diğerleri ile arayı giderek açmıştır.

Serme tipleri arasında ısı yükünün azalma hızı normalize edilmiş sonuçlarla daha net görülebilir. Şekil 4.7’te sonuçlar en yüksek değerlerine göre normalize edildiğinde slinky tiplerinde azalma eğilimleri aynı olmasına karşılık sarmal tipte azalma hızı daha az olduğu ortaya çıkar.



Şekil 4.6 : Yatay ısı değıştircilerinin ısı yükünün test boyunca değışimi.



Şekil 4.7 : Normalize edilmiş test sonuçları.

Buradaki sarmal tip uygulamasında borular arasındaki açıklık bulunduğu ve daha büyük bir alana yayıldığı için ısı yükünün zamanla değişimi açısından daha iyi sonuç vermiştir. Slinky sisteminde boruların üst üste gelmesi ve birbirlerine temas etmesi nedeniyle ısı kısa devreler meydana gelmesi ve daha küçük bir alandan ısı çekmeye çalışılması nedeniyle performansı sarmal tipe göre daha düşük çıkmıştır.

Şekil 4.6 test sonuçlarında düşey slinky'nin aynı gidiş suyu sıcaklığına karşılık daha iyi sonuç vermesi uygulama yapıldığı toprak ile ilgilidir. Uygulandığı yerdeki toprak sıcaklığının düşük olması ve toprağın daha nemli olmasına bağlı olarak ısı transferinin daha iyi olması ısı yükünün yüksek olmasına yol açmıştır. Normalize edilmiş sonuçlarda yatay ve düşey slinky'lerin aynı davranışı göstermesi performans açısından eşit olduklarını göstermektedir. Fakat düşey slinky daha az yer kaplamaktadır. Bu nedenle birim gerekli alan, birim metredeki ısı yükü ve birim maliyetler açısından karşılaştırmalar yapılmalıdır.

4.3 Birim Değerler Üzerinden Bir Karşılaştırma

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 grafikleri incelenirse testlerin başlangıcından belirli bir süre sonra ısı yükü daha doğrusal bir davranış göstermiştir. Grafik üzerinde yapılan inceleme ile tüm serme tipleri için ilk 12 saatten sonraki sonuçlar karşılaştırma için yeterli olacağı görülmüştür.

Birim metrede elde edilen ısı yükü açısından karşılaştırılırsa Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi sarmal tip, borular birbirine temas etmediğinden en yüksek çıkmıştır. Fakat slinky de birçok temas noktası olduğu ve ısı kısa devrelerin daha fazla olması nedeniyle birim boru uzunluğundan elde edilen ısı yükü daha az çıkmıştır.

Çizelge 4.3 : Birim boru uzunluğu açısından ve normalize değerler üzerinden karşılaştırma.

Tip	Top.Uzunluk	Isı Yükü	$\dot{q}'_{toplam-12sa}$	Performans Puanı
	m	W	W/m	$100 * \dot{q}' / \dot{q}'_{eniye}$
Slinky Yatay	100	3810	38.1	66
Slinky Düşey	100	5374	53.7	93
Sarmal	100	5748	57.5	100

Sarmal tip toplamda ve birim uzunlukta daha iyi sonuç vermesine rağmen daha fazla alan işgal etmektedir. Birim uygulama alanı başına değerler açısından bir karşılaştırma yapıldığında Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi, düşey slinky belirgin bir şekilde oldukça az alan kapladığından 12-70 saatlik test sonuçları için birim alandan elde edilen ortalama ısı yükleri yönünden en iyi değer düşey slinky'de elde edilmiştir. Sarmal tip %21, yatay slinky ise %46 daha düşük sonuç vermiştir. Buradaki sonuçlara göre birim alandan elde edilen ısı yükü açısından düşey slinky en iyi sonucu vermiştir. Slinky uygulamasının yatay olarak uygulamanın sarmal tipi uygulamadan daha kötü sonuç verdiği eğer slinky uygulanacaksa bunun düşey olarak uygulanması gerektiği söylenebilir.

Çizelge 4.4 : Birim alanda elde edilen ısı yükü açısından bir karşılaştırma.

Tip	Uygulama Alanı	Isı Yükü	Birim Alandaki Isı Yükü	Performans Puanı
	m ²	W	W/m ²	$100 * \dot{q}' / \dot{q}'_{eniye}$
Slinky Yatay	41.0	3810	92.9	54
Slinky Düşey	31.1	5374	172.8	100
Sarmal Tip	42.0	5748	136.9	79

Birim uzunluk ve birim alanla beraber diğer önemli bir konu da maliyetlerdir. Birim ısı yükü elde etmek için harcanması gereken bedel kullanıcı açısından önem taşımaktadır.

Slinky uygulamalarında kanal açmada aynı yöntem kullanılacaksa maliyetler neredeyse aynı olmaktadır. Kanal açma, boru, işçilik maliyetleri bölgeden bölgeye

değişmektedir. Uygulamanın yapıldığı yer olan *İstanbul* bölgesi için maliyetleri Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi sıralayabiliriz:

Çizelge 4.5 : 100 m uzunluktaki sarmal ve slinky ısı değiştiricilerinin uygulama maliyetleri.

İşin Adı	Slinky Maliyet	Sarmal Maliyet
Kanal açma ve kapama	380 TL	950 TL
PE borular (100m)	1000 TL	1000 TL
Fittings	50 TL	50 TL
Toprak tarafı ince işçilikler	240 TL	450 TL
Tesisat işçilikleri	300 TL	480 TL
Toplam	1970 TL	2930 TL

Elde edilen ısı yükünün ilk yatırım maliyetine oranı hesaplanırsa Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi birim ısı yükü başına ilk yatırım maliyeti; en düşük olan düşey slinky'ye göre yatay slinky'nin % 40, sarmal tip te ise % 38 daha fazladır. Yani düşey slinky ile yatay slinky ve sarmal uygulamalarından % 40 daha ucuza aynı performansı elde etmek mümkün olmaktadır.

Çizelge 4.6 : Birim yatırım maliyeti açısından karşılaştırma.

Tip	Maliyet	Isı Yükü	Maliyet/ $q_{\text{toplam-12sa}}$	% Ekstra Maliyet
	TL	W	TL/W	$100 \cdot (m - m_{\text{min}}) / m_{\text{min}}$
Slinky Yatay	1970	3810	0.52	40
Slinky Düşey	1970	5374	0.37	0
Sarmal Tip	2930	5748	0.51	38

4.4 Helisel Isı Değiştirici İncelemesi

Helisel ısı değiştiricisi genelde düşey olarak uygulanmaktadır. Fakat yatay olarak da uygulanabilmektedir. Düşey olarak açılmış bir kuyu içerisinde helisel borulama yapmanın birim derinlikten elde edilen ısı yükü açısından daha iyi sonuç vereceği beklenen bir sonuçtur ve sayısal bir çalışma (Congedo vd., 2012) ile de kanıtlanmıştır. Bir başka çalışmada birim alan açısından en iyi sonucu vereceğini göstermiştir (Dehghan vd., 2015b). Bu nedenle, helisel borulamada birim ısı transferleri açısından performansının diğerlerine göre yüksek olduğu zaten bilindiğinden, maliyet/performans açısından bir karşılaştırma yapmak gereği duyulmuştur. Kullanılan helisel ısı değiştiricinin özellikleri Çizelge 4.7'de ve uygulama resmi Şekil 4.3'te verilmiştir. Düşey helis alt tabanı yüzeyden 4.5m derinlikte üst tabanı 1.5m derinlikte olacak şekilde yerleştirilmiş, yatay helis ise yüzeyden 1.25m derinliğe

yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık testleri yapıldıktan sonra boşluklar çıkan toprak ile kapatılmıştır.

Çizelge 4.7 : Helisel ısı değiştirici özellikleri.

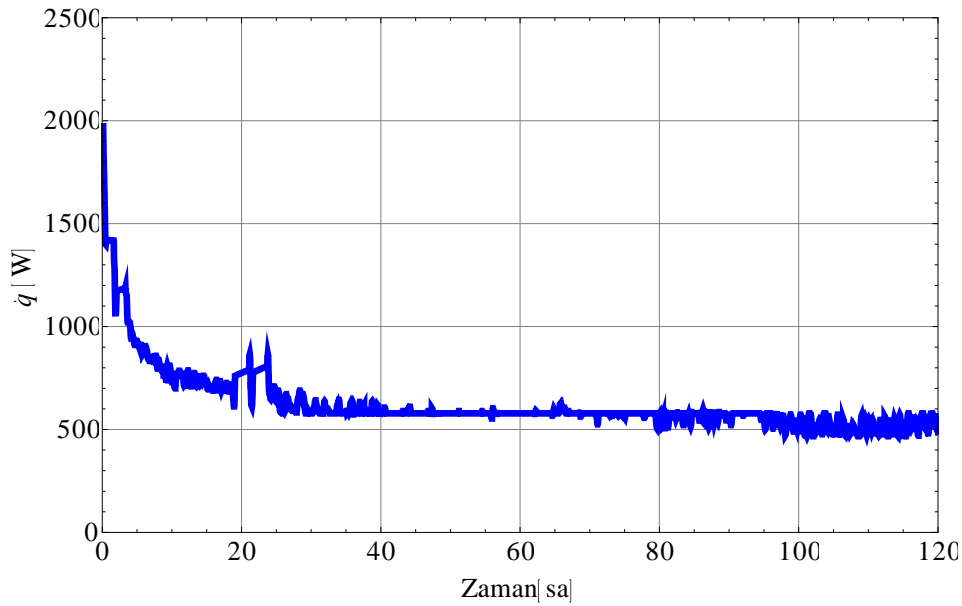
Toplam Boru Uzunluğu	40 m
Boru Malzemesi	PE-Xa
Boru İç Çap	20.4 mm
Boru Dış Çap	25 mm
Helis Çapı	360 mm
Helis Isı Değiştici Uzunluğu	3 m

Yatay ve düşey helisel ısı değiştiricileri aynı koşullarda 40 °C akışkan gidiş sıcaklığı ve 16 lt/dk koşullarında test edilmiştir. Testler süresince toprak sıcaklığının değişimi Çizelge 4.8’de verilmiştir.

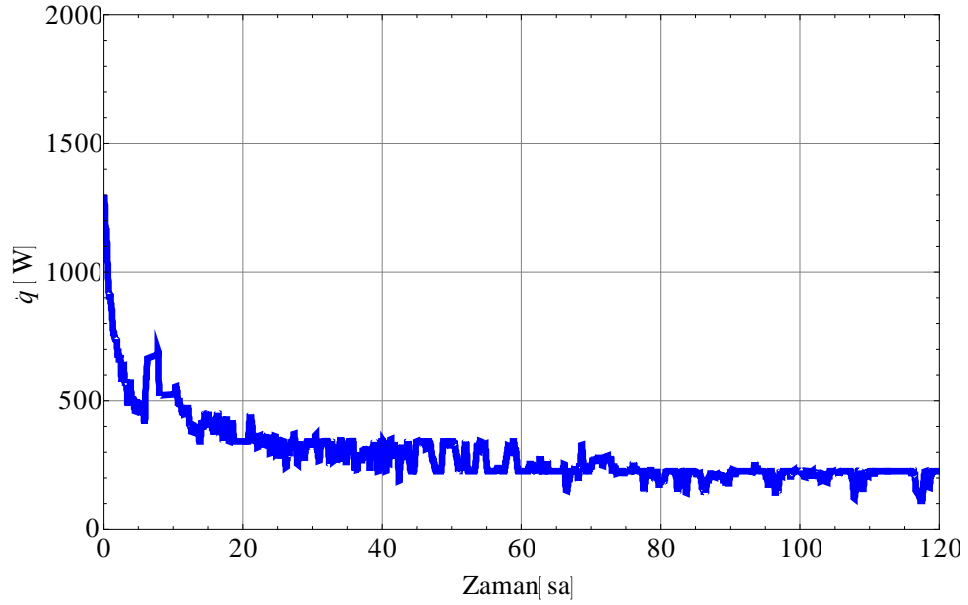
Çizelge 4.8 : Test süresince toprak altı koşulları.

Derinlik	Düşey Helis Testi °C	Yatay Helis Testi °C
z=-0.5m	19.2	16.8
z=-1m	22.2	20.2
z=-1.5m	20.9	19.1

Yatay ve düşey helisel ısı değiştiricilerinde zamana bağlı ısı yükünün değişimi sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.8 : Düşey helis kuyusunda net ısı yükünün zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.9 : Yatay helis kuyusunda net ısı yükünün zamana bağlı değişimi.

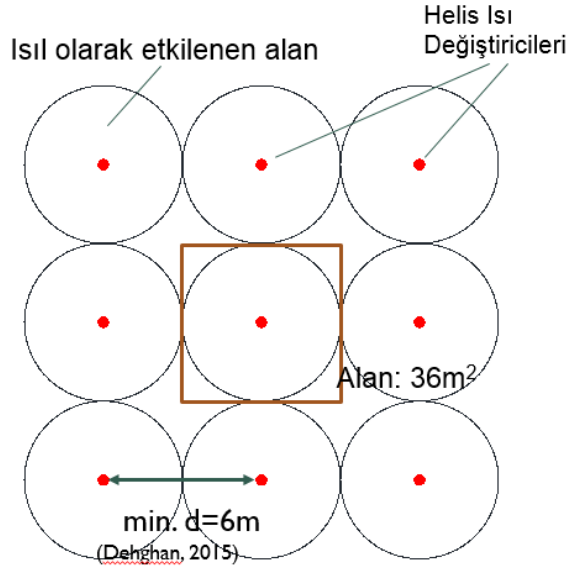
Kuyu/kanal açma, işçilik, malzeme ücretleri eklenince helisel ısı değiştirici uygulamaların maliyetleri Çizelge 4.9'daki gibi olmaktadır.

Çizelge 4.9 : Çizelge 4.7'de verilen özelliklerdeki helisel ısı değiştiricisinin yatay ve düşey uygulama maliyetleri.

TID Tipi	Boru 11.3TL/m	Dolgu 460TL/m ³	Kuyu/kanal Açma	Tek Kuyu/Kanal Top.Maliyet
DüşeyHelis	630	90	150	780 TL
Yatay Helis	630	90	100	700 TL

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 sonuçları incelenirse ilk 25-30 saatlik zaman diliminin sonuna kadar ısı yükü hızlı bir şekilde düşmekte daha sonra değişim daha yavaş ilerlemektedir. Genel olarak Toprak Isı Değiştiricisinin bu bölgede yani değişimin yavaşladığı bölgede çalışacağı varsayılarak 30-120 saatlik sonuçların karşılaştırmaları yapılmıştır.

Helisel uygulamalarda da iki ısı değiştirici arasında belirli bir aralık bırakma gereksinimi vardır. Helisel ısı değiştiricileri için tavsiye edilen asgari aralık, etkileşim ile ısı kaybının %5'in altına düştüğü 6m'dir (Dehghan vd., 2015) Yani bir helisin 6m lik çevresinde başka bir helis bulunmaması gerekmektedir. Bu da çoklu kuyu dizisi içeren bir ısı tarlası için yaklaşık 36 m² lik alan işgal edilmesi demektir. Yatay helisin alan ihtiyacı için bu değere ilave olarak kapladığı yatay alan da ilave edilirse 36 + 0.4 x 3 =37.2 m² alan gereksinimi olacaktır. (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Çoklu helisel uygulaması ve ısıl olarak etkilenen alan.

Elde edilen test sonuçlarının özeti Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Helis test sonuçları.

		Düşey Helis	Yatay Helis
Toprağa gidiş ort. sıcaklığı	°C	40.1	39.8
Toprakтан dönüş ort. sıcaklığı	°C	39.2	39.2
Ort.TID sıcaklığı	°C	39.7	39.5
Ort.Debi	lt/dk	15.9	16.4
Ort.İsı yükü	W	1020.0	756
Ort. Isı Kaybı	W	419.7	465.8
Ort.Net Isı yükü	W	600.3	290.2
Rejime geçtikten (30.saat) sonraki net ısı yükü	W	561.0	242.0
Birim borudan elde edilen ısı yükü	W/m	14.0	6.1
Birim derinlik/kanaldan elde edilen ısı yükü	W/m	187.0	80.7
Uygulama Alanı	m ²	36	37.2
Birim gerekli alandan elde edilen ısı yükü	W/m ²	15.6	6.5
Isı yükünün birim maliyeti	TL/W	1.4	2.9

Çizelge 4.10’da verilen birim ısı yükü için gereken ilk yatırım maliyetleri 1.4TL/W ve 2.9TLW iken Çizelge 4.6’da verilen sarmal, yatay ve düşey slinky ilk yatırım maliyetlerinden (sırasıyla 0.51TL/W, 0.52TL/W, 0.37 TL/W) yüksek çıkmıştır.

Ayrıca birim alandan elde edilen ısı yükü açısından karşılaştırılırsa sarmal, yatay ve düşey slinky birim m² alandan elde edilen ısı yükü sırasıyla 136.9W, 92.8W ve 172.8 W iken helisel boruların birim m² alanından elde edilen ısı yükü 36W/m² ve 37.2W/m² olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni helisel boruların birim alanda fazla derine inmediği ve etrafında fazla bir boş alan bıraktırması gerektiği için düşük çıkmıştır.

Sonuç olarak sığ toprak altı ısı değiştiricilerinden olan helisel uygulamalar, birim derinlikten daha yüksek ısı yükü elde edilmesine rağmen etkileşimle gerçekleşen performans kayıplarının önüne geçilmesi ve etraftaki diğer kuyulardan uzak tutulması gerektiğinden geniş alan gerektirmektedir. Ayrıca helisel boruların maliyetlerinin yüksek olması diğer sığ ısı değiştiricilerden daha fazla ilk yatırım gerektirmektedir. Uygulamaların artması ile maliyetlerin düşmesi ve daha derin helisel düşey uygulamalarla performansı arttırılabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toprak kaynaklı ısı pompalarında toprak ısı değiştiricilerine odaklanılmıştır. Yapılan çalışmaları ve elde edilen sonuçları maddeler halinde şöyle özetleyebiliriz:

- İncelemelerde kullanmak için farklı derinlik, farklı çap, boru aralığı, farklı U sayısı vb. parametrelere sahip toplamda 8 adet kuyu açılmıştır (Ek B).
- Mevcut ısıl tepki testleri incelenmiş, problemleri tespit edilmiş ve daha kısa sürede sonuç veren ve daha esnek olan sabit sıcaklıkta test metodu modeli uygulanmıştır. Analitik olarak geliştirilen model sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Test sistemi laboratuvar ortamında kurulmuş farklı tipteki kuyulara uygulanmıştır. En uygun test süresi incelenerek 25-30 saatlik testlerin de yeterli doğrulukta sonuç verdiği bulunmuştur. Testlerin sıcaklığa olan bağımlılığı da incelenmiş belli bir aralıkta çok fazla etkisi olmadığı sonucuna erişilmiştir.
- Literatürde geçen yatay uygulamalar (sarmal, slinky, helis) yatay ve dışey olarak uygulanmış ve deneysel olarak karşılaştırması yapılmıştır.
- Dışey toprak altı uygulamalarında performansa *en etkili parametrenin kuyudaki boru sayısı olduğu tespit edilmiş* ve genelde 2 adet U borusu uygulanan kuyularda daha önce hiç bir kaynakta karşılaşılmamış olan 3 adet U borusu deneysel olarak denenmiş %30'un üzerinde performansa katkı yaptığı tespit edilmiştir. Ayrıca sayısal modelin elde edilen deneysel sonuçlarla aynı sonuçları verecek şekilde kalibrasyonu ile U borusunu daha da arttırmanın etkisi model yardımıyla incelenmiştir. Birim ısıl güç için ilave U borularına yapılacak maliyetin aynı gücü elde etmek için gereken sondaj maliyetinden fazla olacağı bulunmuştur. Bu sonuçlara göre boruların pahalı olduğu *Türkiye* gibi ülkelerde *2U borusu uygulamasının şu anki maliyetler çerçevesinde en ideal seçim olacağı görülmüştür.*

- 50 m ve 100 m'lik kuyuların performansı karşılaştırılmıştır. 100m'lik kuyuda akışkan boru içerisinde daha fazla zaman geçirdiğinden ve ısıl kısa devreler arttığından performansı daha düşük çıkmıştır. 50m'lik kuyunun birim derinlikteki performansı daha iyi çıkmıştır. Derinliğe bağlı olarak doğal toprak sıcaklığının değişimi ve akışkan ile toprak arasındaki sıcaklık farkları da göz önüne alarak yapılan incelemede yoğun olarak ısıtma amaçlı kullanılacak uygulamalarda derin kuyuların tercih edilmesi ile daha iyi performans elde edilebileceği görülmüştür.
- Farklı akış hızları denenerek performansları karşılaştırılmıştır. Pompadan çekilen güç hızın küpü ile orantılı olacağı için debi ile performans kazanmaya karşılık pompanın çektiği güç artmaktadır. Fakat ani ısı taleplerinin yaşanacağı zamanlarda ilave *resistif ısıtıcılar yerine debi artırması yoluna gidilebileceği söylenebilir.*
- Boru ve kuyu çaplarının ve borular arası mesafenin performansa etkileri sayısal ve deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Kuyu çapı sabit tutularak boru çapının arttırılması çap artışı ile borular arasındaki mesafe azalacağından, çap artışı ile kazanılan enerji borular aralarındaki mesafenin azalması ile ısıl kısa devrenin artması sonucu ile diğer taraftan kaybedildiği bulunmuştur. Bu durumda *kuyu çapının arttırılması düşünülse de bu da ekstra delme ve dolgu maliyeti nedeniyle olumsuz sonuç doğuracağı tespit edilmiştir.*
- Sonuç olarak bir kuyuda ideal olanı boru maliyetine göre 2 veya 3 U borusu kullanılması, *kuyu çapının küçük tutulması ve borular arasındaki mesafenin olabildiğince yüksek tutulması yani boruların çeperlere yaklaştırılmasıdır.*
- Çoklu kuyu alanlarındaki performans kayıplarını araştırmak için *Comsol* modeli kullanılmıştır. Kritik kuyuların performans kayıpları farklı kuyu dizilimleri ve çalışma sürelerinde aralıklara bağlı olarak incelenmiştir. Göz önüne alınan en kötü senaryo olan 2400 saat kesintisiz çalışma için kuyular arasında 6 m aralıkla kuyuların toplam performansındaki kaybın %5'in altında olacağı 10m aralıkta bu kayıp %1'in de altına düşeceği bulunmuştur.

- Yatay uygulamalarda düz tip boru serme sarmal şeklinde uygulanarak, slinky ve helis uygulaması yatay ve düşey olmak üzere deneysel olarak uygulanmıştır. Performanslar karşılaştırılmış, birim boru uzunluğunda en iyi sonuç sarmal tipinde elde edilirken *birim alanda ve birim maliyet açısından en iyi düşey slinky olarak tespit edilmiştir.*
- Nemli bir bölgeden bulunan düşey slinky uygulamasının yüksek değerde çıkması sonucu, uygulamanın nemlilik oranının ve su potansiyelinin yüksek olduğu alanlara uygulanmasının performansın iyi olmasını sağlayacağı öngörülebilir.
- Toprak altı sıcaklık dağılımının yıl içerisindeki değişimini ölçebilmek için 20m derinlikte bir kuyu açılmış her 0.5 m veya 1 m'de bir sensör yerleştirilerek toprak altı sıcaklığının yıllık değişim grafiği 3 yıl için çıkartılmıştır.

Sonuç olarak toprak kaynaklı ısı pompalarında toprak tarafında kullanılan kapalı çevrim uygulamalarının çoğu bu tez kapsamında incelenmiş. Birçok kaynak tarafından en ekonomik ısıtma ve soğutma sistemlerinden biri olarak belirtilen fakat özellikle ülkemizde yeteri derecede yaygınlaşamayan toprak kaynaklı ısı pompalarının yaygınlaşmasının önündeki engellerden en önemlisi olarak gösterilen toprak tarafının maliyetlerinin azaltılmasını ve sisteme olan güvenilirliğin arttırılmasını hedefleyen çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yöntemler, karışımlar vb. saha uygulamalarında da kullanılmış, olumlu sonuçlar alınmıştır.

Uygulama yapılacak bölgedeki toprağın ısıl özellikleri ile ilgili belirsizliklerin giderilmesi ve neticesinde iyi planlama yapılabilmesi ve sistemin uzun ömürlü olmasını sağlamak için mutlaka yapılması gereken Isıl Tepki Testi geleneksel olarak kullanılan sabit ısı akısı yerine sabit sıcaklık ile uygulanmıştır. Test süresinin uzun olması ile sonuçların doğruluğunun yüksek olması yanında kısa süreli test verileri ile de yüksek doğruluğa yakın sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Sabit sıcaklık testi ile uzun zamanlı öngörüler yapılabilmiş ve olabilecek en kötü durum için performans değişimleri bulunmuştur.

Kuyularda kullanılacak ideal kuyu çapı, boru çapı, borular arası mesafe, U-borusu sayısı, kuyular arası mesafe gibi parametreler uygulamadaki öne çıkan belirsizliklerdir. Bu çalışmada bu parametrelerin performansa etkilerinin incelenmesi

ile toprak altı uygulamalarındaki belirsizliklerin giderilmesine çalışılmıştır. U borusunu arttırmanın performansa en büyük katkıyı yaptığı ve mutlaka 2 veya 3 U-borulu uygulamalar yapmanın gerekliliği de bu sonuçlarla ortaya çıkmıştır.

Maliyetlerinin ve performanslarının düşey uygulamalara göre düşük olduğu yatay uygulamalarda maliyet performans analizleri yapılmış, slinky uygulamasının daha iyi sonuçları vermesi ile beraber bu uygulamanın düşey olarak da uygulanması ile uygulama alanını da oldukça azaltacağı sonucu elde edilmiştir.

Uygulamalardaki bu belirsizliklerin kaldırılması ve yapılan doğru uygulamalarla sisteme olan güvenilirliğin arttırılması son kullanıcıların tercihlerinin bu sistem yönünde olmasına yardımcı olacaktır. Bu sonuç kullanıcı açısından ekonomiklik getirmesi yanında, ülke ekonomisine de çoğunluğu ithal olan ve doğaya zararlı olan fosil kaynaklı yakıtların kullanımının azaltılması ile yararlı olacaktır. Bu tarz çalışmaların artması ile bu etki daha da fazla hissedilecek ve yatırımcıların mutlaka ilgisini çekecektir ve çekmektedir. Burada yapılan çalışmalar da bazı tahminler öngörüler ve varsayımlarda da bulunulmuştur. Verilerin kesinlik kazanması daha sonra farklı çalışmalarla sağlanacak veya daha iyisi gösterilecektir. Bu açıdan da gelecek çalışmalar önemlidir.

Gelecekte, burada oluşturulan ısı tepki test sisteminin arazide de uygulanabilir olması için mobil test cihazı geliştirilmesi planlanmış ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca 800m derinliğe ulaşan derin kuyu uygulamaları üzerine yeni çalışmaların başlatılması planlanmıştır. Bunun yanı sıra kuyular arası etkileşimin deneysel ölçümüne yönelik olarak, bu tez çalışmasında elde edilen tecrübeler ışığında yüksek sıcaklıklı ve uzun süreli ısı testin eşzamanlı olarak aralarında 3m mesafe bulunan kuyulara uygulaması yapılacaktır. Benzer şekilde eş-eksenli kuyu uygulaması da düşünülmektedir.

Geleneksel toprak altı uygulamalarında birçok pratik uygulamalar da geliştirilmeye başlanmış ve bu konular gelecek araştırmacıların üzerinde çalışmasını beklemektedir:

- Temel kazıkların ısı kuyuları olarak kullanılması,
- havayı doğrudan bina içinin şartlandırılmasında kullanan sistemlerde toprak içerisinde havanın ısı değiştiricisi olarak kullanılması,

- birçok yerde tek soğutma sistemi olarak kullanılan arada başka bir ısı değiştiricisi kullanmadan toprağın içerisinde akışkanın dolaştırılmasıyla soğutma yapabilen pasif soğutma sistemleri,
- toprakla güneş enerjisinin entegre olarak kullanılması, yazın güneş enerjisinin toprak içerisindeki ısı kuyularına depolanması veya uzun yıllar kullanımla sıcaklık düşümleri yaşanmış kuyuların reşarj edilmesi,
- ısı borusu (heat pipe) teknolojisine benzer olarak toprak altında yüksek basınçlı borularda değişik gazların kullanılması ile
- mekanik aksamı olmadan doğal çalışan sistemler, CO₂ gazının toprak altı kuyularında kullanılması vb. alışmalar gelecekte incelenebilecek konular arasında sayılabilir.

KAYNAKLAR

- Acuña, J.** (2013). *Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes*, (Doktora Tezi), The Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç.
- Acuña, J. ve Palm, B.** (2013). Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers, *Applied Energy*, 109, 312-320.
- Allan, M. L. ve Philippacopoulos, A.,** (2000). Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps, *Proceedings World Geothermal Congress 2000* Kyushu-Tohoku, Japan, May28-June10, 2000.
- Allan M.L ve Kavanaugh S. P.** (1999). Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps. *Int.J. HVAC&R Res*, 5(2),87-98.
- Allan ML.** (2000). Materials characterization of superplasticized cement-sand grout, *Cement and Concrete Research*, 30, 937-942.
- ANSI / ASHRAE** (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy, *ANSI / ASHRAE Standard 55 – 2004*.
- ASHRAE.** (2011). *ASHRAE handbook: HVAC applications*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE; 2011.
- ASTM D5334-14.** (2014). Standart Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, *ASTM International*.
- Austin, W.A.** (1998). *Development of an in situ system for measuring ground thermal properties*, (Yüksek Lisans Tezi), Oklahoma State University, ABD.
- Aydın, M., Sisman, A., Dincer, S., Erdogan, C., Gultekin, A.** (2013). Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Isıl Cevap Testi ve Kuyu Performansının Analitik Öngörüsü, *TESKON*, İzmir, Türkiye, 17-20 Nisan.
- Aydın, M., Sisman, A., Gultekin, A.** (2014). Long Term Performance Prediction of a Borehole and Determination of Optimal Thermal Response Test Duration, *Proceedings, 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA* (2014).
- Aydın, M. ve Sisman, A.** (2015). Experimental and computational investigation of multi U-tube boreholes, *Applied Energy*, 145, 163-171.
- Bandyopadhyay, G., Gosnold, W., Mann, M.** (2008). Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers, *Energy and Buildings*, 40, 1816-1824.
- Banks, D.** (2012). *An Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*, 2nd Edition, *Blackwell Publishing*, UK.

- Beck, A.E.** (1976). The use of thermal resistivity logs in stratigraphic correlation. *Geophysics* 41, 300–309.
- Beier, R. A., Acuña, J., Mogensen, P., Palm, B.** (2013). Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers. *Applied Energy*, 102, 665-675.
- Beier, R. A.** (2014). Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 62, 256-266.
- Beier, R.** (2008). Equivalent Time for Interrupted Tests on Borehole Heat Exchangers, *HVAC&R Research*, 14(3), 489-505.
- Bennet J, Claesson J, Hellstrom G.** (1987). Multipole Method to Compute the Conductive Heat Transfer to and between Pipes in a Composite Cylinder. *Notes on Heat Transfer 3-1987*. Department of Building Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden: 1987.
- Borinaga-Treviño, R., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., Blanco-Fernandez, E.** (2013). Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT. *Applied Thermal Engineering*, 53,13-20.
- Bose, J. E. ve Smith, M. D.** (1992). Performance of new ground heat exchanger configurations for heat pump, *Solar Engineering I*.
- Bozis, D., Papakostas, K., Kyriakis, N.** (2011). On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles, *Energy and Buildings*, 43, 1020-1029.
- BP** (2015). *BP Statistical Review of World Energy*. June 2015.
- Brandl, H.** (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Geotechnique*, 56(2), 81-122.
- Bujok, P., Grycz, D., Klempa, M., Kunz, A., Porzer, M., Pytlik, A., Rozehnal, Z., Vojcinak, P.** (2014). Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values, *Energy*, 64, 120-129.
- Carslaw H. S., ve Jaeger J. C.** (1959). *Conduction of Heat in solids*. Clarendon Press, Oxford, UK, (Chapter XIII).
- Choi, J. M., Park, Y., Kang, S. H.** (2013). Heating performance verification of a ground source heat pump system with U-tube and double tube type GLHEs. *Renewable Energy*, 54, 32-39.
- Chong, C. S. A., Gan, G., Verhoef, A., Garcia, R.G., Vidale, P.L.** (2013). Simulation of thermal performance of horizontal slinky-loop heat exchangers for ground source heat pumps, *Applied Energy* 104, 603-610.
- Choudary, A.** (1976). *An approach to determine the thermal conductivity and diffusivity of a rock in situ*. (Doktora Tezi), Oklahoma State University.
- COMSOL AB**, (2013). COMSOL Version 4.2, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

- Congedo, P.M., Colangelo, G., Starace, G.** (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations, *Applied Thermal Engineering*, 33-34, 24-32.
- Çengel, Y. ve Cimbala, J. M.** (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, İzmir, Güven Bilimsel.
- Çetin, A., ve Paksoy H.** (2015). Shallow Geothermal Application in Turkey, *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19-25 April 2015.
- De Carli, M., Tonon, M., Zarrella, A., Zecchin, R.** (2010). A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers, *Renewable Energy* 35(7), 1537-1550.
- Dehghan, B., Aydın, M., Şişman, A.** (2015a). Long Term Performance Prediction of a Borehole Ground Heat Exchanger by Green's Function Method- *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya*, 19-24 Nisan.
- Dehghan, B., Şişman, A., Aydın, M.** (2015b). Optimizing the Distance Between Boreholes with Helical Shaped Ground Heat Exchanger *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya*, 19-24 Nisan.
- Dickson, M. H., ve Fanelli, M.** (2004). What Is Geothermal Energy? *Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy*. International Geothermal Association (IGA) web sitesinden erişilebilir: http://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html
- Egg, J. ve Howard, B. C.** (2011). *Geothermal HVAC : green heating and cooling*. New York : McGraw-Hill.
- Epri**, (1978). Geothermal Energy Prospect for the Next 50 Years, *EPRI ER-611-SR*, Palo Alto, Ca.
- Erol, S. ve François, B.** (2014). Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 70, 788-799.
- Esen, H. Inalli, M. Esen, Y.** (2009). Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump, *Renewable Energy*, 34, 2672-2679.
- Eskilson, P.** (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. (Doktora Tezi) University of Lund, Department of Mathematical Physics, Lund, İsveç.
- EN14511-2 European Committee** for Standardization, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. No. **EN 14511-2**.
- Florides, G. A., Christodoulides, P., Pouloupatis, P.** (2013). Single and double U-tube ground heat exchangers in multiple-layer substrates, *Applied Energy*, 102, 364-373.
- Focaccia, S. ve Tinti, F.** (2013). An innovative borehole heat exchanger configuration with improved heat transfer, *Geothermics*, 48, 93-100.
- Fujii, H., Nishi, K., Komaniwa, Y., Chou, N.** (2012). Numerical modeling of slinky-coil horizontal ground heat exchangers, *Geothermics*, 41, 55-62.

- Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T., Ishikami, T., Chou, N.** (2013). Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers, *Geothermics*, 47, 61-68.
- Gehlin, S.** (2002) *Thermal Response Test, Method Development an Evaluation*, (Doktora Tezi), Lulea University of Technology, İsveç.
- Gultekin, A., Aydin, M, Sisman, A.** (2015). Thermal Performance Analysis of Multiple Borehole Heat Exchangers, *İşlemde*.
- Go, G.-H., Lee, S.-R., Nikhil, N. V, Yoon, S.** (2015). A new performance evaluation algorithm for horizontal GCHPs (ground coupled heat pump systems) that considers rainfall infiltration, *Energy*, 83, 766-777.
- Hellström, G.** (1991). *Ground heat storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems* (Doktora Tezi). Lund: LTH, İsveç.
- Hu, P., Meng, Q., Sun, Q., Zhu, N., Guan, C.** (2012). A method and case study of thermal response test with unstable heat rate, *Energy and Buildings*, 48, 199-205.
- Incopera, F. P. ve DeWitt, D. P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6.Baskı). NewYork: Wiley. s:514; 2007.
- Ingersoll, L.R., Zobel, O.J., Ingersoll, A.C.** (1954). *Heat Conduction with Engineering Geological and other Applications*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, pp. 325.
- Jalaluddin ve Miyara A.** (2012). Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode, *Applied Thermal Engineering*, 33-34, 167-174.
- Kavanaugh, S. P. ve Rafferty, K.** (1997). Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*.
- Kosukegava, H. ve Fujii, H.** (2015). Development of Thermal Response Test Device with Automatic Control System, *Proceedings World Geothermal Congress 2015* Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Koyun, A., Demir, H., Torun, Z.** (2009). Experimental study of heat transfer of buried finned pipe for ground source heat pump applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 739-743.
- Lamarche, L. Kaji, Beauchamp B.** (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems, *Geothermics*, 39, 187–200.
- Lee, C. K.** (2011). Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation. *Applied Energy*, 88(12), 4405-4410.
- Li, H., Nagano, K., Lai, Y.** (2012). Heat transfer of a horizontal spiral heat exchanger under groundwater advection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23-24), 6819-6831.

- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A.** (2013). Thermal performance and economic evaluation of double U-tube borehole heat exchanger with three different borehole diameters, *Energy and Buildings*, 67, 217-224.
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., Xiang, W.** (2015). Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany, *Geothermics*, 53, 57-66.
- Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J., Fang, Z.** (2010). A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2593–2601.
- Min, L. ve Lai, A. C. K.** (2012). Parameter estimation of in-situ thermal response tests for borehole ground heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2615–2624.
- Mogensen, P.** (1983) Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. *Proc. Int Conf Subs Heat Storage*, 652-657.
- Özışık, N.** (1993). *Heat Conduction* Second Edition. A Wiley Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc. USA, (Chapter III, sn:125).
- Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., Senol, A.** (2014). 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers, *Geothermics*, 51, 312-324.
- Park, H., Lee, S. R., Yoon, S., Choi, J.** (2013). Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation, *Applied Energy*, 103, 12-24.
- Park, SK., Lee, S., Park, H., Yoon, S., Chung, J.** (2013). Characteristics of an analytical solution for a spiral coil type ground heat exchanger, *Computers and Geotechnics*, 49, 18-24.
- Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D.** (2009). Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes, *Geothermics*, 38, 407-413.
- REHAU Raugeo** Technic of System, *Technical Catalog*, 827600/1, (2011).
- Raymond, J. ve Lamarche, L.** (2014). Development and numerical validation of a novel thermal response test with a low power source. *Geothermics*, 51, 434-444.
- Rohner, E., Rybach, L., Schärli, U.** (2005). A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Türkiye*, p.4.
- Sanner, B., Hellstrom, G., Spitler, J.D., Gehlin, S.E.A.** (2005) Thermal response test – current status and world-wide application. *Proceedings World Geothermal Energy Congress*, Antalya, Turkey.
- Self, J. S., Reddy, B. V., Rosen, M.A.** (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341-348.
- Sharqawy, M.H., Mokheimer, E.M., Badr, H.M.** (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers, *Geothermics*, 38, 271–277.

- Shirazi, A.S., ve Bernier, M.** (2013). Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers, *Energy and Buildings*, 67, 352-364.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T.** (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36,141-166.
- Simms, R. B., Haslam, S. R., Craig, J. R.** (2014). Impact of soil heterogeneity on the functioning of horizontal ground heat exchangers, *Geothermics*, 50, 35-43.
- Somerton, W.H.** (1992). *Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems*, Elsevier, New York, A.B.D.
- USEPA,** (2008). Energy Star Program. *U.S. Environmental Protection Agency*. Heating and cooling →geothermal heat pumps, <http://www.energystar.gov>.
- Thomson, W. (Lord Kelvin).** (1884). *Mathematical and Physical Papers*, vol. 2. Cambridge University Press, London, UK, pp. 41–60.
- Url-1**<<http://www.alpha-innotec.ie/SEEEMS/102926.asp>>, alındığı tarih: 01.07.2015
- Url-2**<<https://www.bp.com/>>, alındığı tarih: 01.07.2015
- Url-3**<<http://www.pompaciepla.eu>>, alındığı tarih: 01.07.2015
- Url-4**<<http://www.igdas.com.tr/YakitKarsilastirmasi?id=0&lang=tr&sc=0>>, alındığı tarih: 01.07.2015
- Url-5**< www.ehpa.org>, alındığı tarih: 01.06.2012
- Url-6**< www.enerji.gov.tr/>, alındığı tarih: 01.05.2014
- Wagner, V., Bayer, P, Blum, P.** (2015). Separating conductive and advective heat transport in thermal response tests. *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya*, 19-24 Nisan.
- Wang,, H., Qi, C., Du, H., Gu, J.** (2010). Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system, *Renewable Energy*, 35, 727–733.
- Witte, H. J. L., van Gelder, G., Spitler, J.D.** (2002). In-Situ Thermal Conductivity Testing: A Dutch Perspective. *ASHRAE Transactions*. 108(1), 263-272.
- Witte, H. J. L.** (2013). Error analysis of thermal response tests, *Applied Energy*, 109, 302-311.
- Wood, C. J., Liu, H., Riffat, S.B.** (2012). Comparative performance of ‘U-tube’ and ‘coaxial’ loop designs for use with a ground source heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 37, 190-195.
- Wu, Y., Gan, G., Verhoef, A., Vidale, P. L., Gonzalez, R. G.** (2010). Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2574-2583.
- Yang, H., Cui, P., Fang, Z.** (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy*, 87, 16-27.

- Yavuztürk, C.** (1999) *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems.* (Doktora Tezi), Oklahoma State University.
- Yu, X., Zhang, Y., Deng, N., Wang, J., Zhang, D., Wang, J.** (2013). Thermal response test and numerical analysis based on two models for ground-source heat pump system, *Energy and Buildings*, 66, 657-666.
- Zanchini, E., Lazzari, S., Priarone, A.** (2010). Improving the thermal performance of coaxial borehole heat exchangers. *Energy*, 35, 657-666.
- Zanchini, E., Lazzari, S., Priarone, A.** (2012). Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow, *Energy*, 38, 66-77.
- Zarrella, A., Scarpa, M., Carli, M. D.** (2011). Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM, *Renewable Energy*, 36(9), 2357-2367.
- Zarrella, A., Capozza, A., De Carli, M.** (2013a). Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers: A simulation-based comparison. *Applied Energy*, 112, 358-370.
- Zarrella, A., Carli, M. D., Galgaro, A.** (2013b). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 61, 301-310.
- Zeng, H., Diao, N., Fang, Z.** (2003) Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46:4467-4481.

EKLER

EK A: Toprak Altı Sıcaklık Ölçümü Uygulaması ve Sonuçları

EK B: Kuyuların Hazırlanması

EK C: Toprak Isı Değiştiricileri Yerleşim Planı

EK D: Tez Zaman Cetveli

EK A : TOPRAK ALTI SICAKLIK ÖLÇÜMÜ UYGULAMASI VE SONUÇLARI

Kullanılacak Sensörlerin Hazırlanması:

Toprak altı sıcaklığının 20 m derinliğe kadar yıl boyunca sürekli ölçümü ve açılan diğer kuyularda belirli derinliklerde sıcaklıkları görmek amacıyla yeterli güvenilirlik ve sağlamlıkta olan Pt100 sıcaklık sensörleri²¹ kullanılmıştır. Testlerin daha güvenilir sonuçlar vermesi ve ekstra incelemelere imkan vermesi açısından kuyularda kullanılan borulara da sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Ayrıca kablo uzunluğundan bağımsız olarak sıcaklık ölçümüne imkân verdiği için 3 telli kablolar tercih edilmiştir.

Sensörlerin Kalibrasyonu:

Tüm sıcaklık sensörlerinin akredite bir kuruluş tarafından (*Türkak, Türk Akreditasyon Kurumu*) kalibrasyonları yapılmıştır. Daha sonra Pt100'lerin tedarik edildiği firma tarafından bir ucu kapalı küçük bir silindir içerisine konularak içerisi ısı pastası olan silikonla doldurulmuş ve istenilen uzunlukta kablolar hazırlanarak tarafımıza teslim edilmiştir. Tedarikçi firma tarafından yapılan bu işlemlerden sonra sensörler doğrulama amacıyla tekrar kalibre edilmiştir. Bu amaçla tüm sıcaklık sensörlerinin uçları bir demet halinde bağlanarak içi su dolu bir kap içerisine daldırılmıştır. (Şekil A.1)

Daha sonra farklı su sıcaklıklarında (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 °C) sensörlerin verdiği sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.

Aşağıda verilen işlemler uygulanarak kalibrasyon denklemleri çıkartılmıştır:

Sıcaklık değerleri : $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$

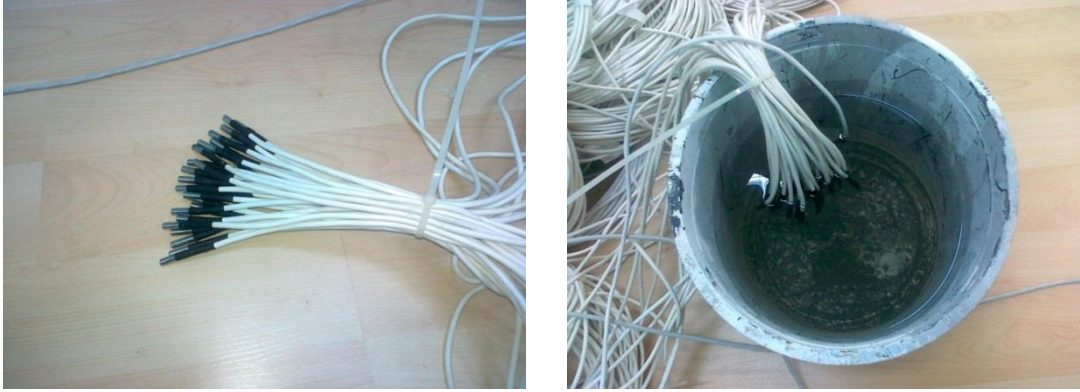
²¹ Pt100 sıcaklık sensörlerinde Platin eleman kullanılmaktadır. Buradaki sıcaklık ölçümü Platin elemanın direncinin ölçümüne dayanmaktadır. Pt100 elemanı 0 °C sıcaklıkta 100Ω dirence sahiptir. Ayrıca Pt1000 elemanı 0 °C sıcaklıkta 1000Ω dirence sahiptir. Pt 100 elemanındaki bu direnç 100 °C de 134,8Ω olur. Sıcaklık ve direnç arasında doğrusal bir değişim olduğu için 1 °C sıcaklık değişimi 0,348Ω direnç değişimine yol açmaktadır. Pt100 sensörlerinin hassasiyet derecesi 0 °C sıcaklıkta ±0,3C dir.

Ortalama sıcaklık : $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$

Sapma : $\Delta T_i = \bar{T} - T_i$

Maksimum Sapma : $\Delta T_{max} = \max[|\bar{T} - T_i|_{i=1}^N]$

Standart Sapma : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{T} - T_i)^2}$



Şekil A.1 : Pt100 sensör demeti ve kova içerisine daldırma.

Bu sonuçlara göre elde edilen çizelge ve sonuçlar Çizelge A.1’de verilmiştir:

Çizelge A.1: Sensörlerde okunan değerler ve sapmalar.

No	T (°C)	$ \Delta T_i $
T_1	23.1	0.1
T_2	23.3	0.9
T_3	23.2	1.2
...
T_N	23.4	0.8

$\bar{T} = 23.25$ ve $\sigma = 0.111$, $T_{max} = 3.5$ °C

Her bir sensör için ayrı sıcaklıklarda elde edilen sapmalar Çizelge A.2’de gösterilmiştir buradan hareketle her bir sensör için bir grafik elde edilir.

Çizelge A.2: Her bir sensör için farklı sıcaklıklardan elde edilen sonuçlar.

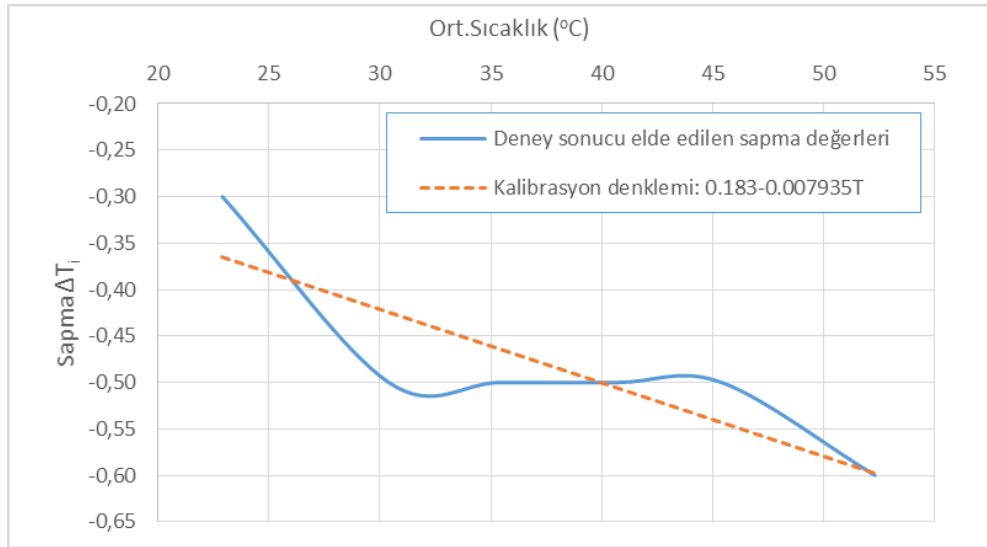
	1	2	3	4	5
\bar{T}	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	...	ΔT_N
5 °C	0.01	0.09	0.11	...	0.15
10 °C	0.30	0.07	0.35	...	0.12
15 °C	0.38	0.05	0.58	...	0.16
...
50 °C	0.50	0.11	0.45	...	0.21

Buradan $\Delta T_i - \bar{T}$ grafiği elde edilerek her bir sensör için bir kalibrasyon denklemi çıkartılır.

$$\Delta T_i = a_1 + b_1 \bar{T}$$

$$T_r = T + (a_1 + b_1 T)$$

Böylece T_r (gerçek sıcaklık) elde edilmiş olur. Örnek bir sonuç Şekil A.2’de verilmiştir.



Şekil A.2: 1.1 kod numaralı sensör için test sonuçları elde edilen sapma ve en uygun doğrusal sapma eğrisi.

Tüm sensörler için aynı işlem tekrarlanırsa her biri için ayrı kalibrasyon denklemleri elde edilir. Elde edilen denklemler Çizelge A.3’te verilmiştir. Sonuç olarak ve $\sigma = 0.2$, $\Delta T_{max} = 0.4$ °C olarak bulunmuştur.

TASO Borusunun Hazırlanması:

Toprak altı sıcaklığı belli bir derinlikten sonra yıl boyu sabit kalmakta daha derinlerde ise jeotermal etki sebebiyle doğrusal olarak artmaya devam etmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılacak toprak altı sıcaklık ölçümünde 20metre derinliğe kadar yıllık ölçüm yapılmıştır. Sensör yerleştirilen derinlikler Çizelge A.4’te verilmiştir:

Çizelge A.3: Kullanılan sensörlerin kalibrasyon denklemleri.

No	Kodu	Uzunluk	Kullanıldığı yer	Kalibrasyon Denklemi
1	1.1	6 m	TASO 0m	$T_g=T-0.183-0.007935*T$
2	1.2	6.5 m	TASO -0,5m	$T_g=T-0.262-0.008033*T$
3	1.3	7 m	TASO -1m	$T_g=T-0.197-0.0067*T$
4	1.4	7.5 m	Arızalı	$T_g=T-0.411-0.01114*T$
5	2.1	8 m	TASO -2m	$T_g=T-0.2983+0.00171*T$
6	2.2	8.5 m	TASO -2,5m	$T_g=T-3.56+0.000823*T$
7	2.3	9 m	TASO -3m	$T_g=T$
8	2.4	11 m	TASO -5m	$T_g=T-1.8638-0.00712*T$
9	3.1	13.5 m	TASO -7,5m	$T_g=T-0.2856-0.007425*T$
10	3.2	16 m	TASO -10m	$T_g=T-0.328-0.0125*T$
11	3.3	18 m	TASO -12m	$T_g=T+0.654-0.00979*T$
12	3.4	20 m	TASO -14m	$T_g=T-0.1644-0.01855*T$
13	4.1	22 m	TASO -16m	$T_g=T+1.3-0.003945*T$
14	4.2	24 m	TASO -18m	$T_g=T+0.7882-0.009375*T$
15	4.3	26 m	TASO -20m	$T_g=T+0.45-0.0066*T$
16	6.1	5 m	-	$T_g=T+0.654-0.00979*T$
17	6.2	20 m	50mÇiftU -15m	$T_g=T+0.67-0.012*T$
18	6.3	35 m	50mÇiftU -30m	$T_g=T+0.782-0.009214*T$
19	6.4	55 m	50mÇiftU -50m	$T_g=T-0.0836+0.0119*T$
20	7.1	4 m	-	$T_g=T+0.6035-0.00714*T$
21	7.2	19 m	50mTekU -15m	$T_g=T+0.558-0.0112*T$
22	7.3	34 m	50mTekU -30m	$T_g=T+0.5711-0.00584*T$
23	7.4	54 m	50mTekU -50m	$T_g=T+1.285-0.0115*T$
24	8.1	7 m	-	$T_g=T+0.6864-0.0155*T$
25	8.2	22 m	100mTekU -15m	$T_g=T+0.7214-0.009813*T$
26	8.3	37 m	100mTekU -30m	$T_g=T+0.4019-0.004455*T$
27	8.4	57 m	100mTekU -45m	$T_g=T+0.1136+0.01197*T$
28	9.1	82 m	100mTekU -75m	$T_g=T+0.4852-0.0027*T$
29	9.2	107 m	100mTekU -100m	$T_g=T+0.167+0.001753*T$
30	9.3	7 m	TASO -1.5m	$T_g=T+0.6908-0.00988*T$
31	9.4	22 m	12mKuyu -12m	$T_g=T+0.1209-0.01684*T$

Toprak altı sıcaklık ölçümünde kullanılacak sensörlerin toprak altına yerleştirilmesi için en uygun ve güvenli yöntemlerden biri, plastik bir boru içerisine kabloların yerleştirilmesi ve belli derinliklerde sensörlerin boru dış yüzeyine çıkarılarak sabitlenmesidir. 6mm çapında kablolardan oluşan toplam 15 kablo için en az 30mm iç çapta boru kullanmak gerekmektedir.(Şekil A.3) Buradaki çalışmada kolaylık olması amacıyla bir üst çapta 40mm çapında boru seçilmiştir.



Şekil A.4: Sensör yuvası



Şekil A.5: Kablo ve sensörlerin yerleştirilme aşamaları.

Şekil A.5'te görüldüğü gibi sensör yerlerindeki delikten çıkan kablo ucundaki sensör, açılan yuvaya oturtulmuş, bantlanmış ve çelik kelepçe ile sıkılmıştır.

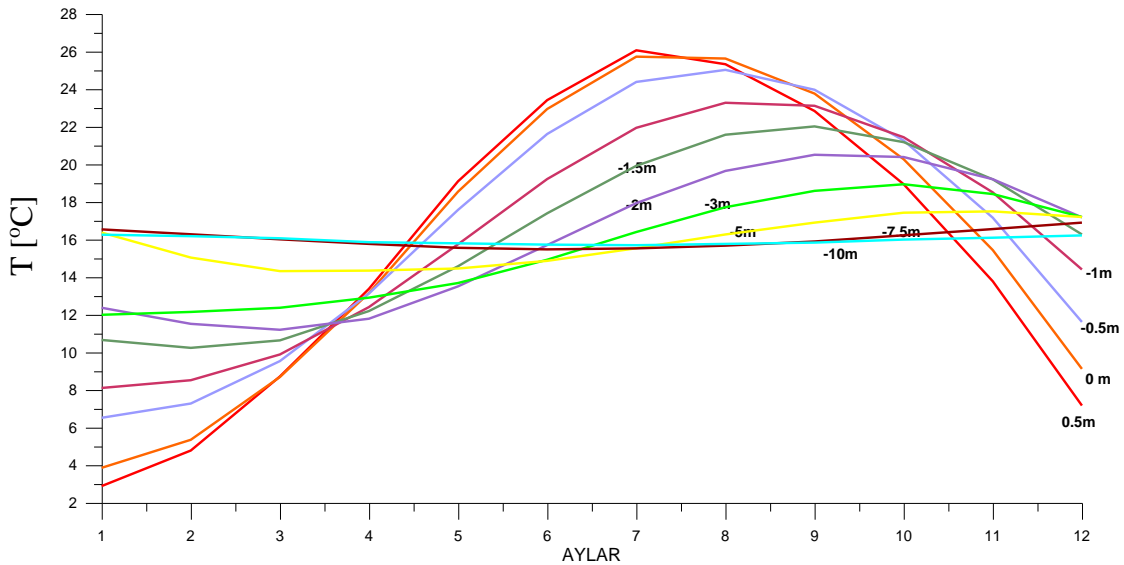
Sensörlerin yerleştirilmesi bittikten sonra sensörlerin son bir kez daha veri toplama cihazına bağlanarak çalışıp çalışmadığı test edildikten ve olumlu sonuç alındıktan sonra tüm boru yarığın kapanması için plastik bant ile boydan boya kaplanmış ve sensörlerin üzeri Şekil A.6'da görüldüğü gibi etiketlenmiştir.



Şekil A.6: TASSO'nun bitmiş durumdaki hali.

TASSO Sonuçları:

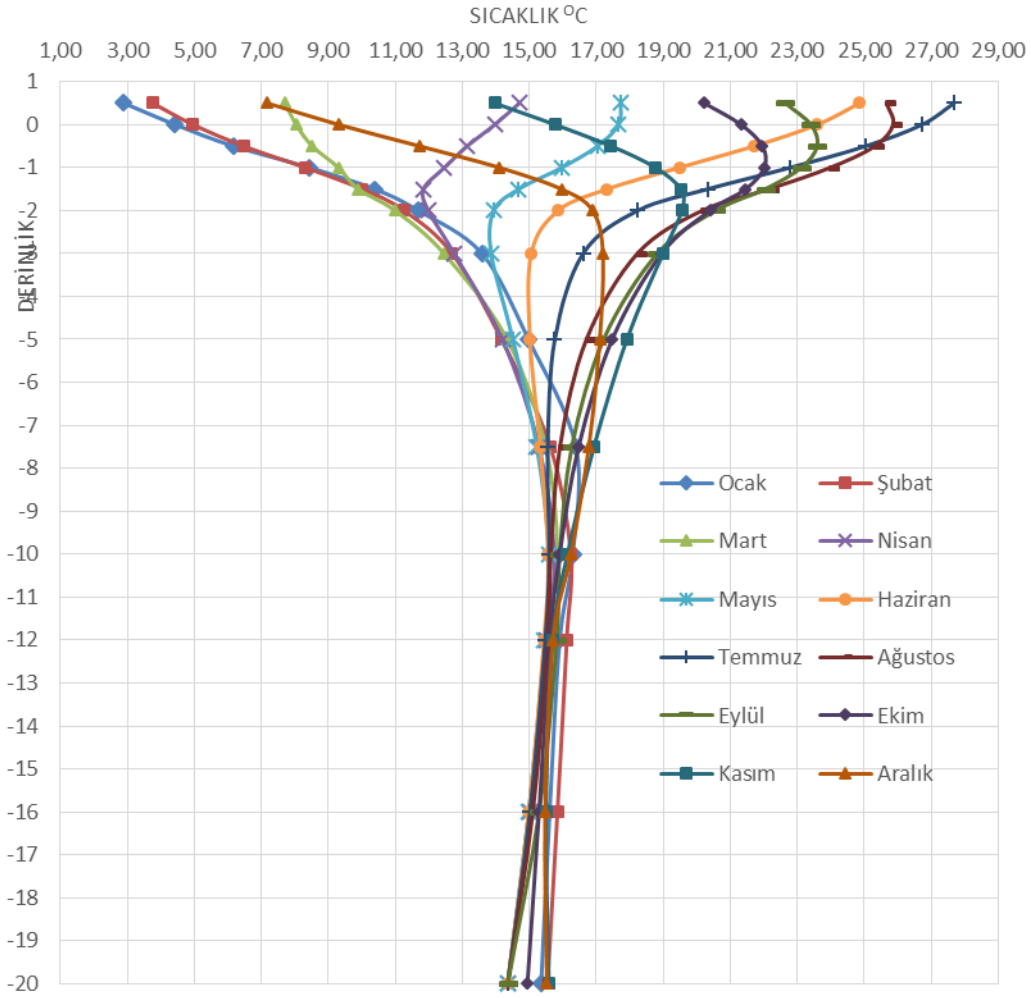
Bu çalışma çerçevesinde toprak kaynaklı ısı pompaları uygulamalarının doğru yapılabilmesi için oldukça önemli olan bu grafiğin *İstanbul/Maslak* test sahasında yapılan gerçek zamanlı ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil A.7, Şekil A.8, Şekil A.9 ve Şekil A.10'da verilmiştir. Çeşitli derinliklerdeki toprak altı sıcaklık değerleri her 5 dakikada bir ölçülerek kaydedilmiş ve günlük, aylık ve yıllık sıcaklık-derinlik grafikleri çıkartılmıştır.



Şekil A.7: *İstanbul/Maslak* 2012 yılı toprak altı sıcaklıklarının yıllık değişimi.

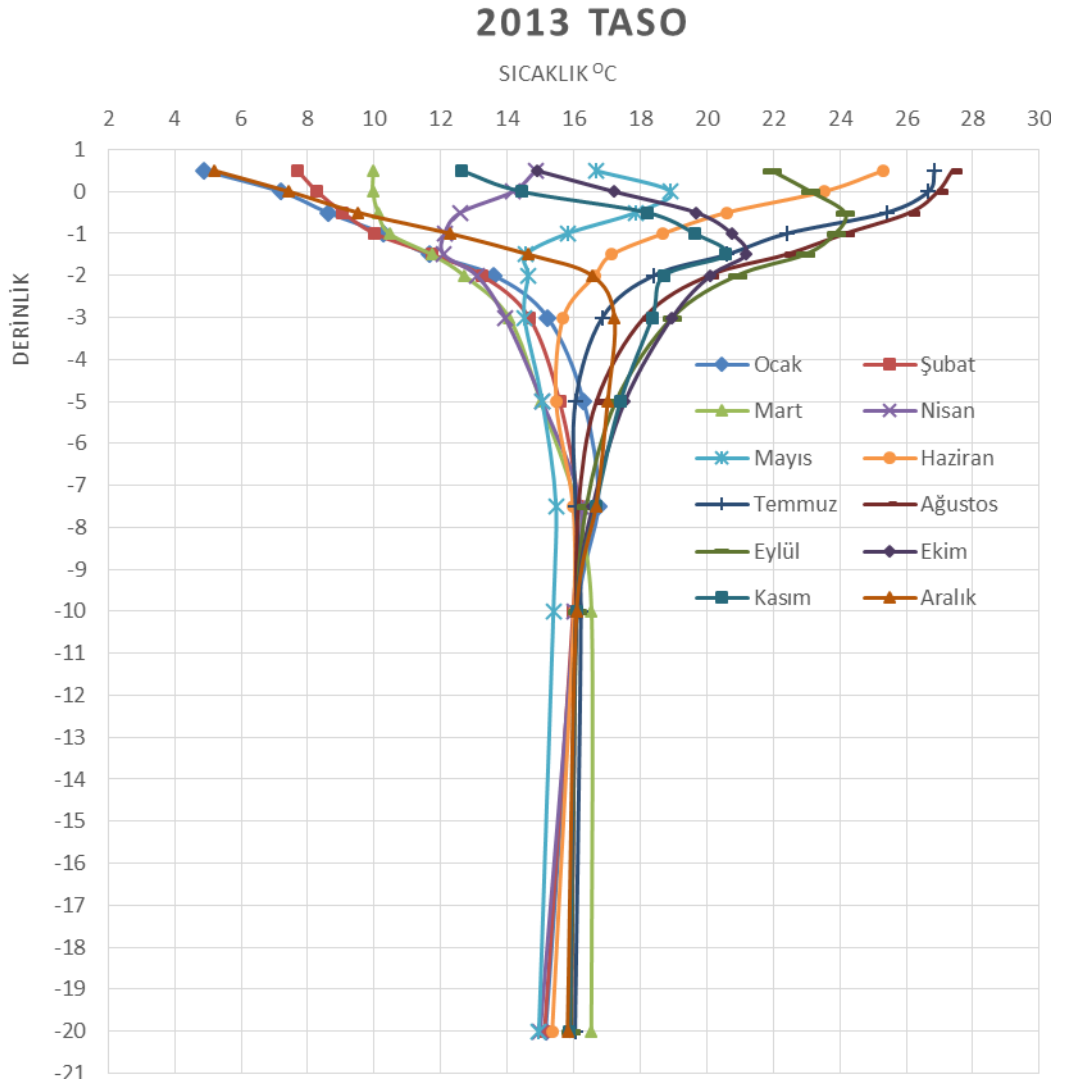
Şekil A.7'de görüldüğü gibi havayla temas halinde olan yüzey nedeniyle 6-7 m derinliğe kadar toprak sıcaklığı aylara bağlı olarak etkilenmektedir. Ancak daha derinlere inildikçe bu etkilenme azalmakta ve 8 m gibi bir derinlikten sonra toprak sıcaklığı hava sıcaklığı değişiminden pratik olarak etkilenmemektedir. Bu değişim, derinlik -sıcaklık grafiğinde daha detaylı olarak Şekil A.8'de görülmektedir.

2012 TASO

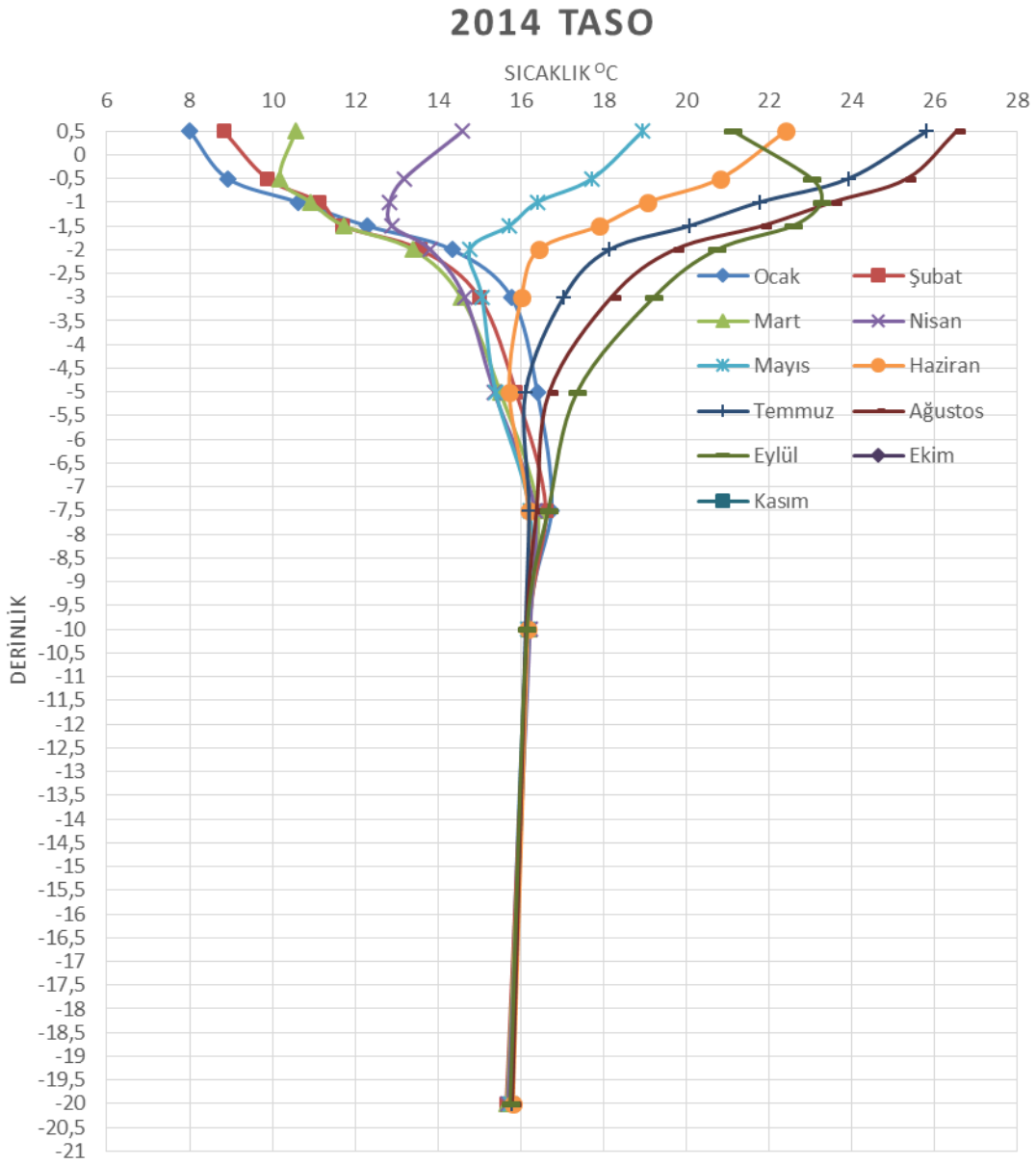


Şekil A.8: *İstanbul/Maslak* 2012 yılı toprak altı sıcaklığının derinlikle değişimi.

2012 yıl başından önce başlatılan test 2015 yılı itibari ile halen devam etmektedir. 2013 yılına ait elde edilen toprak altı sıcaklık derinlik grafiği Şekil A.9’da 2014 yılına ait grafik ise Şekil A.10’da verilmiştir. Şekil A.8 ve Şekil A.9’da 20 m derinlikteki sensördeki değişimler bu bölgede toprak altı su hareketleri olduğunu Şekil A.10’da bu sensördeki değer yıl boyu aynı değeri vermesi o yıl için su hareketinin durduğu izlenimini vermektedir.



Şekil A.9: İstanbul/Maslak 2013 yılı toprak altı sıcaklığının derinlikle değişimi.



Şekil A.10: İstanbul/Maslak 2014 yılı toprak altı sıcaklıklarının derinlikle değişimi.

EK B : ÇALIŞMADA KULLANILAN KUYULARIN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada kullanılan kuyuların özellikleri ve hangi incelemelerde kullanılacağı Çizelge B.1’de verilmiştir. Kuyuların yerleşimi de haftalık deneyle de birbirinden etkilenmeyecek ve gerektiğinde aylık deneylerle kuyular arası mesafeyi inceleyebilecek şekilde konumlandırılmıştır.

Çizelge B.1: Açılan kuyuların özellikleri ve kullanıldığı incelemeler.

Kuyu Kodu:	KUYU ÖZELLİKLERİ					KULLANILACAK İNCELEME						
	Kuyu Çapı	Kull.Boru Çapı	U borusu sayısı	Kuyu Derinliği	Borulararası Mesafe	TASO	ÇOKLU U	KAMET	KUDET	BAMET	AHET	BOÇET
TASO	17cm	Ø40	-	20m	-							
K1	17cm	Ø32	1	50m	9cm							
K2	17cm	Ø32	1	46m	9cm							
K3	17cm	Ø32	2	50m	9cm							
K4	17cm	Ø32	1	100m	9cm							
K5	20cm	Ø40	1	50m	9cm							
K6	20cm	Ø32	3	50m	13cm							
K7	17cm	Ø32	-	12m	-							
K8	40cm	Helis	-	3m	-							

Boruların Hazırlanması:

Toprak altı incelemelerinde uzun ömürlü ve ucuz olması nedeniyle çoğunlukla Polietilen boru kullanılmaktadır. Bu çalışmada yapılan incelemelerde kullanılacak tüm borular, uzun yıllardır yüksek kalitede ürünleri ve hizmet anlayışı ile dünyanın çeşitli ülkelerinde faaliyet göstermekte olan *REHAU* firması tarafından araştırmamıza destek olmak amacıyla ücretsiz teslim edilmiştir.

Kelepçelerin Hazırlanması:

Toprak altında kullanılan U borularında gidiş ve dönüş boruları arasında belli bir aralık bırakılması gerekir. Aksi durumda borular birbirine temas edeceği için ısı kısa devreler meydana gelebilir bu da toprak altında birim metreden elde edilecek ısı transferini azaltacaktır. Yaptığımız araştırmalar sonucu elde edilen bilgilere göre

ülkemizde bu tip mesafe tutucu aparatlar kullanılmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca ülke içerisindeki tesisat piyasasında hazır mamul bu tip kelepçe vb. ürün bulunamamıştır. Bu nedenle Şekil B.1’de çizimleri verilen kendi kelepçe tasarımımızı yapma ihtiyacı doğmuştur.



Şekil B.1: 2’li kelepçe çizimleri.

Açılacak kuyuların çapı Ø17cm içerisinde geçebilecek maksimum genişlikteki U borusu için tavsiye edilen azami değer Ø14cm olarak sondajcı firma tarafından bildirilmiştir. Ø32mm çaplı borularda kullanılacak olan rotlu kelepçeler ve buna yönelik olarak hazırlatılacak rot ve 2’li ve 4’lü kelepçe tasarımları Şekil B.1 ve Şekil B.2’de verilmiştir.



Şekil B.2: 4’lü kelepçe.

Bu çizimlere dayanarak elde edilen kelepçelerde U borusunun gidiş ve dönüş boru merkezleri arasındaki mesafe 9 cm olmuştur. 4’lü kelepçeler ise hazırlanan 2’li kelepçelerin rotlarının merkezlerinden kaynak ile birleştirilmesi ile elde edilmiştir.

Hazırlanan kelepçeler U borularında her metrede bir tane olacak şekilde kullanılmıştır (Şekil B.3).



Şekil B.3: Hazırlanan borular.

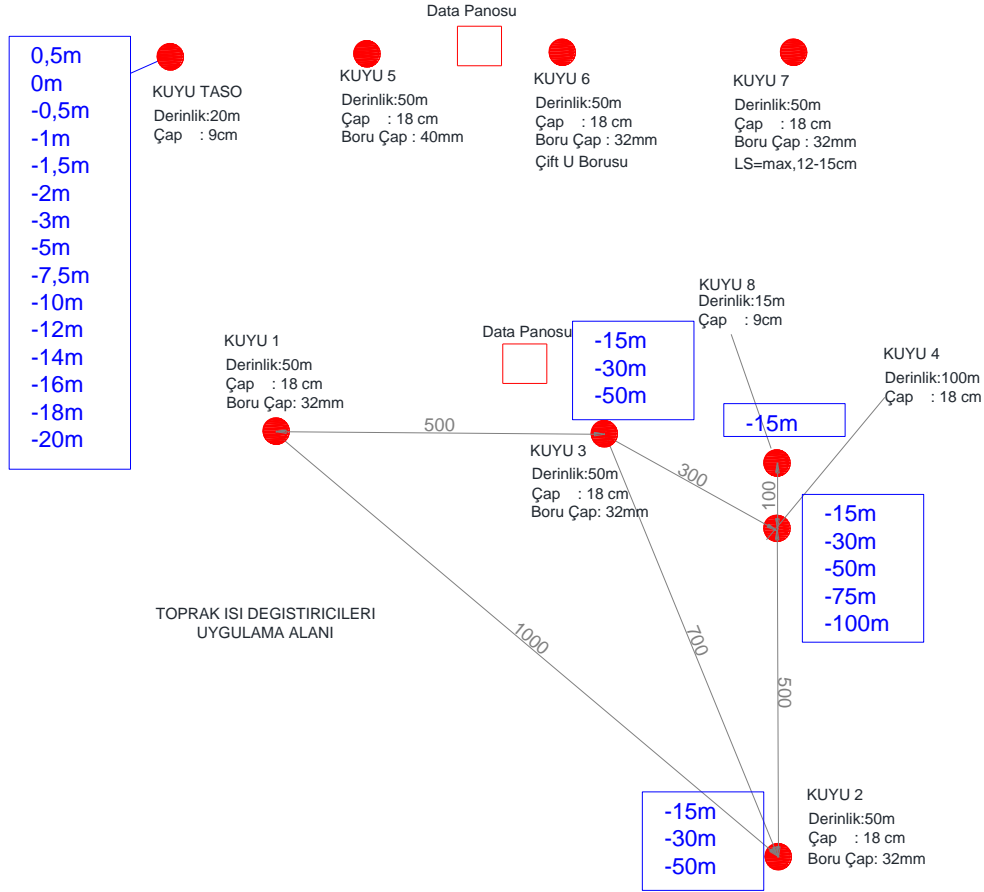
Borulara Sensörlerin Yerleştirilmesi:

Toprak altı sıcaklıklarını ölçmek için kullanılacak sensörler kuyulara indirilecek olan boruların üzerine kelepçeler ve kablo kelepçeleri yardımı ile tutturulmuştur. Sensörler kaymaması için ayrıca bantlanmıştır. Kelepçe ve sensörlerin durumu Şekil B.4'te verilmiştir.



Şekil B.4: Kelepçelerin ve sensörlerin borulara tutturulmuş hali.

Kuyularda kullanılan sensör derinlikleri Şekil B.5'te kutular içerisinde verilmiştir.



Şekil B.5: Sensör yerleşim yerleri.

Ağırlıkların Seçilmesi ve Hazırlanması:

Açılan kuyulara boruların indirilmesi sırasında U borusunun kuyuya rahat inmesi ve kuyu içindeki muhtemel suyun etkisi nedeniyle yüzer konuma geçmemesi için U borusunun en uç kısmına bir ağırlık bağlanması gerekmektedir. Ağırlık seçimi için literatürde herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Fakat uygulamacı firmalar arasında çeşitli görüşler bulunmaktadır. U borularında kullanılacak ağırlıklar, borunun rahatça indirilmesini sağlayacak, yukarıda boruları indiren işçiler tarafından kolay yönetilebilecek şekilde seçilmiştir. Daha derin kuyularda kuyunun düşey düzlüğü tam olarak sağlanamadığı ve boru indirilmesi çok kolay olamadığı için daha büyük ağırlıklar kullanılması daha uygundur. Bu kıstaslara dayanarak seçtiğimiz ağırlıklar aşağıdaki şekildedir.

100m Kuyu	: 60kg
50m Kuyu	: 30kg
20m Kuyu	: 15kg

Kuyuların çapları Ø170mm olduğu için Ø130mm çapında silindirik içi dolu demir malzeme seçilmiştir. Borunun indirilmesi sırasında kuyu kenarlarına takılmaması için köşelerinden Şekil B.6’da görüldüğü gibi pah alınmıştır.



Şekil B.6: U borusunun kuyuya indirilmesi aşamasında kullanılan ağırlık.

Kuyuların Açılması:

İlk etapta Çizelge B.1 ve EK C’de özellikleri ve yerleşimleri verilen kuyulardan Kuyu Taso, Kuyu 1,2,3,4 ve Kuyu 7 açılmıştır. Kuyuların açılmasında basınçlı hava kullanarak delme işlemi yapan ve delme ucu olarak 17 cm çapında takımın kullanıldığı sondaj makinesi kullanılmıştır. Kuyu açma aşaması Şekil B.7’de görülmektedir.

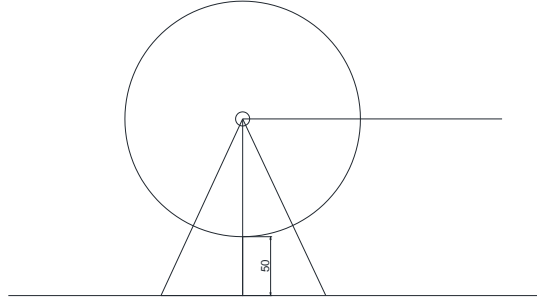


Şekil B.7: Kuyu açma işlemi.

TASO için hazırlanan 20m’lik TASO borusu ile Kuyu 1 ve 2’de tek U 50m Rehau PE sondaj boruları, Kuyu 4’te ise tek U 100m sondaj borusu kullanılmıştır. Kuyu 3’te ise KAMET ve KUDET incelemelerinin yapılabilir olması sebebiyle 4’lü kelepçelerle hazırlanmış olan çift U borusu kullanılmıştır. Çift U borusu hem çift hem de tek olarak kullanılabilme imkânına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Makara Tasarımı:

Kuyulara boruların indirilmesini kolaylaştırmak, boruların, kelepçelerin ve üzerlerindeki sensör kablolarının zarar görmemesi amacıyla makara kullanmak gerekmektedir. Bu amaçla aşağıda çizimleri ve resmi verilen makara hazırlanmıştır (Şekil B.8).



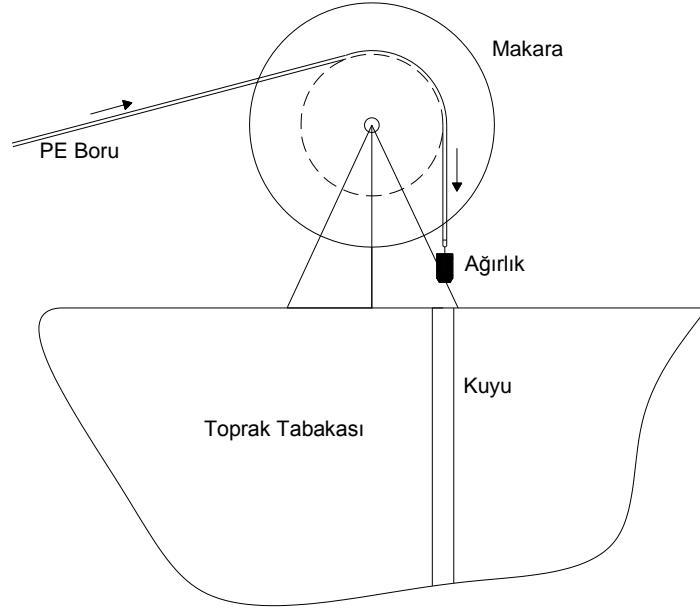
Şekil B.8 : Boru indirmede kullanılan makara.

Kuyulara Boruların İndirilmesi:

Dışarıda hazırlanarak kuyulara indirilmeye hazır hale getirilen PE borular kuyu açma işlemi biter bitmez, hazırlanan makara yardımıyla Şekil B.9'da gösterilen yöntemle kuyu içerisine indirilmiştir. Ayrıca PE boruların yanı sıra borular indirildikten sonra kuyunun etrafına basılacak dolguyu kuyu dibinden yukarı doğru basmak için ekstra bir Ø40 PE boru indirilmiştir. Bu dolgu basma borusu U borusunun uç kısmına bant ile tutturulmuş ve işlem bitimini takiben çekilerek kuyu dışına alınmıştır.

Boruların Test Edilmesi:

Sondaj bitiminde kuyulara indirilen boruların dolgu basma işlemine geçmeden önce boru indirme sırasında oluşabilecek olası hasarlara karşı test edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple U boruları indirildikten sonra bir ucu kapatılıp diğer ucundan su verilerek 4-5bar basınçta su verilip birkaç gün beklemeye bırakılmış ve böylece kaçak testi yapılmıştır.



Şekil B.9 : Boru indirme işlemi.

Dolgu Seçilmesi ve Basma Yönteminin Belirlenmesi:

Kuyulara U boruları indirildikten sonra kuyunun boş kalan kısımlarının iletkenlik değeri yüksek bir dolgu malzemesi ile doldurulması ısıl iletkenliği arttıracığından kuyunun performansını arttıracaktır. Seçilecek dolgunun ısıl iletkenlik değeri yüksek ve çatlamalara, kırılmalara, ısıl gerilmelere karşı dayanıklı olması istenmektedir. Çatlamlar ve büzölmeler aralarda hava boşlukları meydana getireceği için ısı transfer değerini azaltacaktır. Ayrıca dolgunun karıştırılması ve kuyu içerisine basılması dikkat edilmesi gereken bir süreçtir. Dolgunun homojen bir yapıda olması için bir karıştırıcı ile karıştırılması ve ayrıca dolgunun kuyuya basılması sırasında aralarda hava boşluğuna yol açmayacak şekilde dipten yüzeye doğru basılması gerekmektedir.

Kuzey Amerika ve İskandinav ülkelerinde toprak kaynaklı ısı pompaları sistemleri daha yaygın olduğu için hazır mamul paketlenmiş dolgular bulunmakta ve bunlar sadece su ile karıştırılıp kuyulara basılabilmektedir. Üreticiler ve ürünlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

<i>Baroid – Barotherm Plus</i>	max:2,06 W/mK
<i>Cetco – High TC Geothermal Grout</i>	0,68-2,05 W/mK
<i>MGS - Geosolid 235</i>	max: 2,35 W/mK
<i>Wyo-Ben Therm-Ex Grout</i>	max: 3,11 W/mK
<i>Heidelberg Cement - Powercrete Premix</i>	Yaş: ≥ 4 W/mK, Kuru: ≥ 3 W/mK

Yukarıda verilen iletkenlik değerlerinden görüldüğü gibi kuyularda özel karışım bir dolgu kullanmak sadece bentonit kullanmaktan 3-4 kat daha fazla iletkenlik değeri elde etmeyi sağlamaktadır. Bu ürünlerin hepsi yurtdışında olması sebebiyle ülkemize getirilmesi maliyetli ve zahmetli olması nedeniyle kendi laboratuvar imkânlarımızla bu karışımı hazırlama ihtiyacımız ortaya çıkmıştır.

Literatürde dolgu üzerine yapılan önemli çalışmalardan biri olan *Marita Allan* ve *Aristodimos Philippacopoulos* (2000) yaptıkları çalışmada *Brookhaven* Ulusal Laboratuvarlarında iletkenlik değeri maximum 2,35 W/mK olan *Mix111* ismini verdikleri bir karışım geliştirmişlerdir. Bu karışımın içeriği ve oranları Çizelge B.2’de verilmiştir.

Çizelge B.2 : *Mix111* içeriği ve içerik oranları.

<i>Mix 111</i>		
Çimento	0,42	kg
Su	23,5	litre
Kum	45	kg
Süperakışkanlaştırıcı	0,64	litre
Bentonit	0,47	kg
<i>Elde edilen Ürün</i>	<i>72,2</i>	<i>litre</i>

Kullanılan kumun özellikleri ortaya çıkan ürünün iletkenlik değerini etkilemektedir. Kuvars esaslı Silis (Silika) kumu uygun fiyatı ile yüksek iletkenlik değeri vermektedir. Ayrıca Çizelge B.3’te görüldüğü gibi kumun tanecik boyutları da yüzde geçirgenlik ve iletkenlik değerine etki etmektedir.

Çizelge B.3’te 200 kodu normal çimento tanecikleri boyutundadır. Bu çalışmada 70/80 kodlu Dökmal Silis Kumunu ile *Mix111* karışımı göz önüne alınarak karışım yapılmıştır. *Allan* ve *Philippacopoulos* bazı durumlarda bentonitin ihmal edilebileceğini söylemiştir.

Çizelge B.3: Silis kumu özellikleri.

Elek No	Tanecik Boyutu (µm)	% Geçirgenlik
8	2360	100
16	1180	95-100
30	595	55-80
50	297	30-55
100	149	10-30
200	75	0-10

Ayrıca *MixIII* karışımında süper akışkanlaştırıcı yerine su miktarını arttırmak da aynı sonucu verebilmektedir. Bu kıstaslara göre hazırladığımız karışım aşağıdaki şekilde olmuştur.

Silis Kumu	100 kg
Çimento	50 kg
Su	50 lt

Su oranının fazla kullanılmasının nedeni hazırlanan dolgunun pompa ile basılabilecek kıvama getirilmesi nedeniyledir. Bu oranlardaki kum, çimento ve su bir varil içerisine karıştırılarak daha büyük ebattaki diğer bir varile aktarılmıştır. Bu büyük varil içerisinde bulunan çamur pompası yardımıyla ve kuyu içerisinde fazladan indirilen dolgu basma borusu (Ø40 çapta) ile kuyuya dipten itibaren dolgu basılmıştır. Dolgu basılırken borunun içeride kalmaması ve pompanın zorlanmaması için dolgu basma borusunu yukarı doğru çekmek gerekmektedir. Bir varilin kuyu içerisinde doldurduğu yüksekliği hesaplayarak çekme işlemi yapılmalıdır ve hava kabarcıkları oluşmaması için boru sürekli dolgu yüzeyinin altında bulunmalıdır.

$$V_{varil} = \frac{\pi}{4} (D_{kuyu}^2 - N_U D_U^2) \cdot l \text{ denkleminde } l \text{ çekilirse;}$$

$$l = \frac{4 \cdot V_{varil}}{\pi \cdot (N_U D_{kuyu})^2} \text{ çekilmesi gereken boru uzunluğu bulunabilir.}$$

Burada N_U ifadesi U borusu sayısını temsil etmektedir. Yaptığımız hesaplara göre her bir varil karışım için dolgu basma borusunu 4m çekmek gerekmiştir. Böylece dipten itibaren toprak yüzeyine kadar hava boşluğu kalmadan dolgu basılmaya çalışılmıştır ve dolgu basma borusu kuyu içerisinden tamamen çekilmiştir. Daha sonra kuyunun iç kısımlarında bulunan muhtemel çatlaklardan meydana gelebilecek sızıntılar ile dolgunun aşağı çökmesi ihtimaline karşı kuyunun etrafı toprakla doldurularak dolgu havuzu meydana getirilmiştir. Böylece dolgunun aşağı çökmesi ile besleme sağlanmıştır.

Kuyularda Karşılaşılan Sorunlar ve Öneriler:

Sensörler:

Hem kuyu gidiş dönüş sıcaklıkları arasındaki farkın hem de kuyu boyunca olan sıcaklık farklarının birkaç derece olması nedeniyle seçilecek sıcaklık sensörlerinin hassasiyet, doğruluk, belirsizlik gibi özellikleri çok önem arz eder. Bu çalışmada

kuyularda Pt100 Isıl Tepki Test Sisteminde ise Pt1000 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi Pt100 sıcaklık sensörleri $\pm 0,3C$ hassasiyet derecesine sahiptir. Bir adet Pt100 sıcaklık sensörü fiyatı 12€, daha hassas ölçüm yapabilen Pt1000 sıcaklık sensörü ise 18€ dur. Küçük miktarlarda sensör ihtiyacı gereken yerlerde daha hassas ölçüm yapabilen Pt1000 veya Pt10k sensörlerinin kullanılması daha doğru sonuçlar alınmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca uygulayıcı firmanın hazırladığı bir tarafı kapalı boş silindir ve içerisine doldurulan silikon ısı pastası ile hazırlanan sensörlerin gösterdiği değerler arasında çok farklılıklar gözlemlenmiştir. Uygulayıcı firmanın bu işte tecrübeli olması veya hazırlık aşamalarında kontrol edilmesi işin düzgün yapılması açısından faydalı olacaktır.

Sensörlerin borulara montajı:

Şekillerde görüldüğü gibi sensörler borular üzerine kelepçeler yardımı ile tutturulmuştur. Pt100'lerin uçları ekstradan bantlanmıştır. Boruların indirilmesi sırasında borunun ucunda bulunan ağırlığın ve borunun kendi ağırlığının etkisi ile boru üzerinde bir uzama meydana gelmektedir. Borudaki uzama oranı, kabloda gerçekleşen uzama oranından fazla olduğundan dolayı kabloya yük binmekte ve kopabilmektedir. Bunun örneği 100m'lik kuyuda yaşanmıştır. Bu kuyuda indirme sonrasında kontrol edildiğinde sadece 15m deki sensörün çalıştığı görülmüştür. Ayrıca borular indirilirken açılan kuyunun çeperlerine sürterek aşağı inen borunun üzerindeki kablolar aynı şekilde zarar görebilmekte hatta kopabilmektedir. Çift U ve Üç U borulu kuyularda kablolar boruların kendisi tarafından korunarak dış yüzeye kablo gelmemesi sağlanmıştır. Bunun sonucunda kabloların hiçbiri zarar görmemiştir. Çift U borulu ve Üç borulu bu kuyulardaki sensörler problemsiz çalışmaya devam etmiştir. Fakat 2 numaralı kuyuda sensörlerin iki tanesi zarar görmüş ve çalışmamaktadır.

Yapılacak en uygun çözüm kabloların bir koruyucu kullanarak ve uzama farkı payları bırakılarak borulara tutturulmasıdır. Bu durumda kablolar indirilme esnasında zarar görmeyecek ve olası uzama farklarında kablo üzerine de gerilme yükü binmeyecektir.

Kelepçelerin Hazırlanması:

Bu çalışmada mevcut piyasada satılan 1" rotlu kelepçeler ve arada bir rot parçası kullanarak 2'li, 4'lü ve 6'lı kelepçeler hazırlanmıştır. Kelepçelerin ve rotların maliyetleri çok yüksek olmasa da kelepçelerin hazırlanması işgücü gerektirmektedir. En uygun borular arası mesafe tespit edildikten sonra borular arası mesafenin sabit

olduğu veya ayarlanabildiği kelepçelerin toplu olarak plastik bir kalıptan ürettirilmesi işgücü ve maliyet açısından daha iyi sonuçlar verecektir.

Ağırlıkların Seçilmesi:

Boruların indirilmesi sırasında görüldüğü gibi 40-50 m gibi çok derin olmayan kuyularda bu çalışmada tercih edilenden daha hafif ağırlıklar ile borular indirilebilir. 100m kuyuda 30-40kg, 50m'lik kuyularda 15-20kg ağırlıklar yeterli gelebilir. Ayrıca demir parça yerine maliyeti daha düşük olabilecek beton vb. başka malzemeler de kullanılabilir.

Kuyuların Açılması:

2 numaralı kuyuda 50m kuyu açıldıktan hemen sonra boru indirilmeye başlanmış fakat boru 46m derinliğe kadar inebilmiştir. Böyle bir durumla karşılaşmamak için kuyuların açılması sırasında istenen kuyu derinliğinden 1-3m fazla derinlikte kuyuyu açtırmak yararlı olabilir. 50metre derinlikte istenen kuyu için 51-52 metre, 100metre derinlik istenen kuyuda 102-103 metre yapılması dipte meydana gelebilecek olası çökmelerin dipte birikmesi sonucu kuyu derinliğinin istenenden daha kısa olmasını önleyecektir.

Makara:

Makaranın tamburu, taşıma kolaylığı açısından biraz daha küçük seçilebilir. Boru indirilme sırasında boru makara üzerinden kayabilmektedir. Makaranın borunun değdiği kısımları kaymayı önleyici bir malzeme ile kaplanabilir. Ayrıca boru indirilirken ağırlığın etkisi ile makara dönüşü hızlanmakta ve kontrolü zorlaşmaktadır. Bu sebeple bir fren ve kontrol mekanizması kurulmalıdır.

Uygulamaların yapılması sırasında piyasada hazır mamul 2U, 3U kelepçeleri bulunmadığı için kelepçeler dışarıda hazırlanmış ve borulara sensörlerle beraber monte edilmiştir. Sensör kullanılmayacağı ve hazır kelepçeler kullanılacağı durumda bir vinç yardımı ile paketinden çıkarılmış kangal borunun frenli makara sistemi ile kuyuya yavaş bir şekilde indirilmesi ve indirme sırasında kelepçelerin takılması da yapılabilir. Bu yöntemin yurtdışında başarılı örnekleri mevcuttur.

Dolgu Basma:

100 metrelik kuyuda (Kuyu 4), dolgu basma borusu yukarı çekilme işleminde geç kalındığı için belli bir yerden sonra boru çıkarılamamıştır. Elle ve araçla çekme işlemi de fayda vermemiştir. Bu sebeple kuyuya gönderilen dolgunun seviyeyi ne kadar yükselttiği iyi hesaplanmalı ve dolgu basma borusu aralıksız yukarı doğru çekilmelidir.

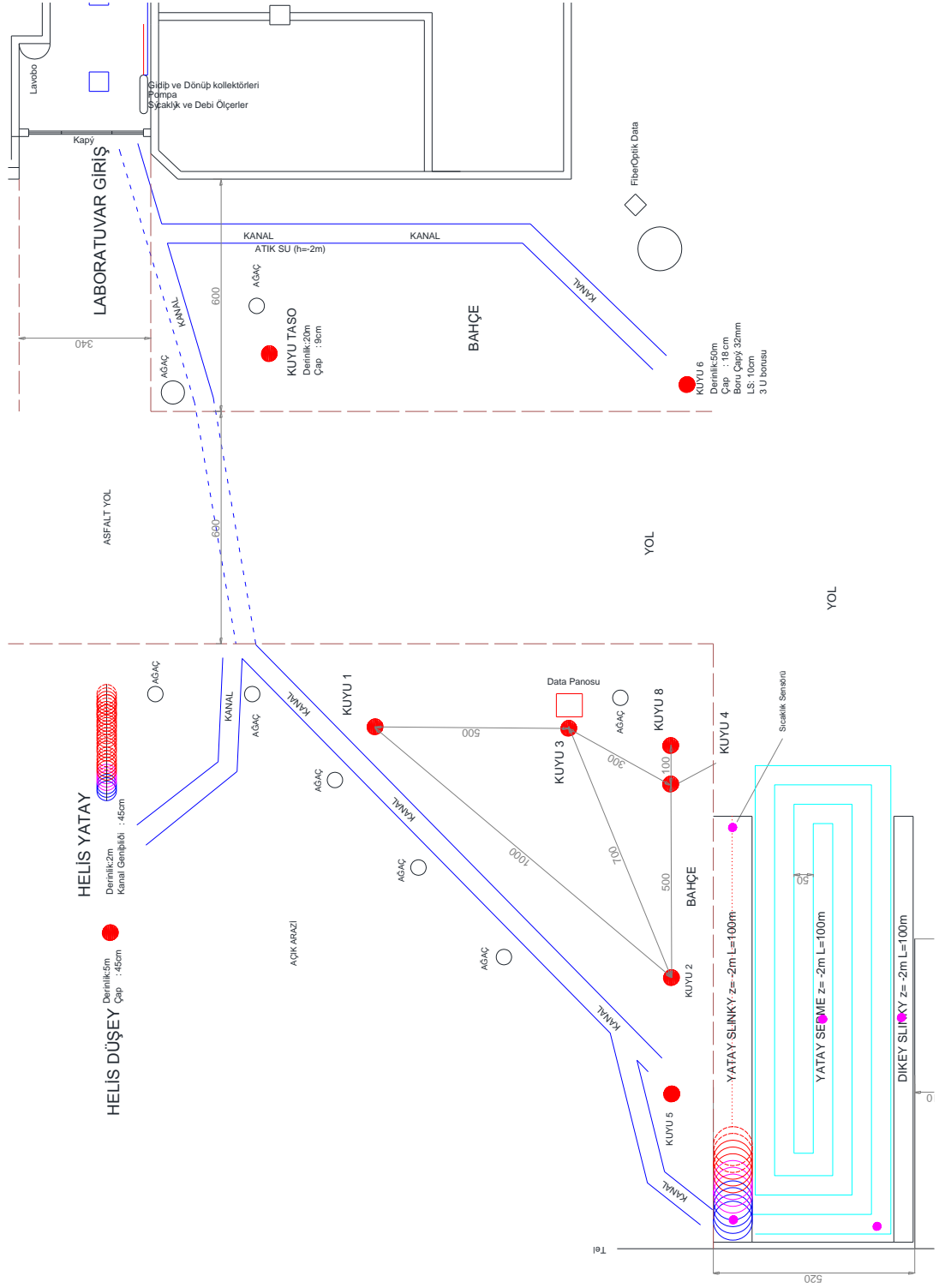
Dolgu basmada çok zorluk yaşanmamıştır. Ø40 Pe boru rahat bir şekilde basmak için kullanılabilir.

Dolgu basma borusu yüzeye doğru çekildikçe yüzeyde biçimsiz bir şekilde durmakta ve çalışmayı zorlamaktadır. Yukarı çekilen boru bir makaraya sarılarak daha düzgün bir toplama işlemi yapılabilir. Ya da kuyu doldurma işlemi tamamlandıktan sonra dolgu basma borusunun içerisi de tamamen dolgu ile doldurularak içeride bırakılabilir.

Kuyuya dolgu basma işlemine başladıktan sonra ara verilmesi borunun içerisinde hava oluşmasına yol açmakta ve pompanın durmasına yol açmaktadır. Bu sebeple dolgu basmaya başladıktan sonra kuyu dolana kadar pompanın durmaması sağlanmalıdır.

1.etap kuyularında (1, 2, 3, 4) süperakışkanlaştırıcı kullanılmamış 2.etap kuyularda (5, 6) süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kullanımı fazla su kullanmadan dolgunun yeterli akışkanlıkta olmasını sağlamaktadır. Süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile su miktarı azaltılmakta bu da ısı iletkenlik değerinde daha iyi bir sonuç sağlamaktadır. Bu nedenle kullanılması tavsiye edilmektedir. 1.etaptaki dolgularda 1.7 W/mK 2.etap kuyularında 1.9 W/mK sonuçları elde edilmiştir. 6 numaralı kuyuda, 5 numaralı kuyu ile aynı dolgu karışımı kullanılmış, fakat polietilen borunun ısı iletkenlik değerini ilave etmediğiniz zaman dolgu sonuçları 0.9 W/mK gibi bir sonuç çıkarmıştır. Polietilen borunun et kalınlığı da çözümlerde kullanıldığında kuyu 6 dolgusunda elde edilen ısı iletkenlik kuyu 5 ile aynıdır.

EK C : TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ YERLEŞİM PLANI



Şekil C.1 : Toprak Isı Değiştiricileri yerleşim planı

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Murat Aydın
Doğum Yeri ve Tarihi : Üsküdar 02.09.1979
E-Posta : murataydin@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2002, Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** :2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Uluslararası SCI Yayınlar

- **Aydın, M.** ve Şişman, A. (2015). Experimental and computational investigation of multi U-tube boreholes, *Applied Energy*, **145**, 163-171.
- Gültekin, A., **Aydın, M.**, Sisman, A. (2015). Thermal Performance Analysis of Multiple Borehole Heat Exchangers, *In Progress*.
- Dehghan, B., Sisman, A., **Aydın, M.** (2015) Parametric Investigation of Helical Ground Heat Exchangers for Heat Pump Applications, *In Progress*.

Ulusal Hakemli Konferans Bildirileri

- **Aydın, M.**, Şişman, A., Dinçer, Ş., Erdoğan C., Gültekin, A. (2013). Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Isıl Cevap Testi ve Kuyu Performansının Analitik Öngörüsü, *The 11nd Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Teskon, İzmir*, 17-20 Nisan.

Uluslararası Hakemli Konferans Bildirileri

- **Aydın, M.**, Şişman, A., Gültekin, A., (2014). Long Term Performance Prediction of a Borehole and Determination of Optimal Thermal Response

Test Duration, *39. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Üniversitesi / ABD, 24-26 Şubat.*

- Gültekin, A., **Aydın, M.**, Şişman, A. (2014). Determination of Optimal Distance Between Boreholes - *39. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Üniversitesi / ABD, 24-26 Şubat.*
- **Aydın, M.**, Şişman, A., Gültekin, A., Dinçer, Ş., Erdoğan, C. (2014). Experimental measurement and long term predictions of a multi-U tube borehole performance for ground source heat pumps – *11th IEA Heat Pump Conference, Montréal (Québec) Canada, 12-16 Mayıs.*
- Gültekin, A., **Aydın, M.**, Şişman, A., Dinçer, Ş., Erdoğan, C. (2014). An experimental investigation of the effects of some design and operational parameters on heat transfer rate per unit borehole length ; *11th IEA Heat Pump Conference, Montréal (Québec) Canada, 12-16 Mayıs.*
- **Aydın, M.**, Şişman, A., Gültekin, A., Dehghan, B. (2015). An Experimental Performance Comparison between Different Shallow Ground Heat Exchangers- *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya, 19-24 Nisan.*
- Dehghan, B., **Aydın, M.**, Şişman, A. (2015). Long Term Performance Prediction of a Borehole Ground Heat Exchanger by Green's Function Method- *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya, 19-24 Nisan.*
- Dehghan, B., Şişman, A., **Aydın, M.** (2015). Optimizing the Distance Between Boreholes with Helical Shaped Ground Heat Exchanger *World Geothermal Congress 2015 Melbourne/ Avustralya, 19-24 Nisan.*