

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞEY BORULU TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASININ
KONUT İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE
MEVSİMLİK DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Hikmet ESEN

Tez Yöneticisi:
Prof. Dr. Mustafa İNALLI

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞEY BORULU TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASININ
KONUT İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE
MEVSİMLİK DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Hikmet ESEN

Doktora Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa İNALLI

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde derin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam sayın Prof. Dr. Mustafa İNALLI'ya sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışmanın ekserji analizi kısmında bilgisinden faydalandığım sayın Prof. Dr. Kazım PIHTILI'ya, çalışmanın yapay zeka teknikleri ile modelleme kısmında desteğini gördüğüm sevgili arkadaşlarım sayın Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir ŞENGÜR ve sayın Yrd. Doç. Dr. Davut HANBAY'a da teşekkür ederim.

Kış mevsiminde 40 gün devam eden sondaj kazı çalışması ve yapılan deneysel çalışmalar süresi boyunca bana katlanan, sabreden sevgili eşime de teşekkür ederim. Ayrıca, deney düzeneğinin en zor kısmı olan sondaj kısmının kazı işlemlerinde yanımdan hiç ayrılmayan yeri geldiğinde de maddi olarak desteğini gördüğüm sevgili babam ve anneme, tez'de literatür eksikimi ve konu ile ilgili genel bilgilerimi tamamlayan ağabeyim sayın Doç. Dr. Mehmet ESEN'e de ayrıca sonsuz şükranlarımı sunarım.

Kazı çalışması sırasında bana yardımcı olan sevgili arkadaşım Dr. Asım BALBAY'a ,deney düzeneğinin kurulmasında ve deney sırasında çıkan her türlü aksaklıkları gideren, pratik bilgisinden çok faydalandığım sevgili arkadaşım teknisyen sayın Mehmet SERTKAYA'ya teşekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen 1153 no' lu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP personeline ve TÜBİTAK Hızlı Destek grubu tarafından maddi olarak desteklenen 106Y188 nolu projemize katkıda bulunan bütün ÇAYDAG personeline de ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	IX
SİMGELER	X
KISALTMALAR	XIII
ÖZET	XIV
ABSTRACT	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	2
2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ ESASLAR	14
2.1. Yeraltı sulu ısı pompası sistemleri (YASIP)	16
2.2. Toprak bağlantılı ısı pompası (TBIP) sistemleri	17
2.2.1. Düşey toprak bağlantılı ısı pompası sistemleri	17
2.2.2. Yatay toprak bağlantılı ısı pompası sistemleri	18
2.3. Yüzey sulu ısı pompası (YSIP) sistemleri	19
2.4. Sabit sütun kuyulu (SSK) sistemler	20
3. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI TASARIMI	21
3.1. Isı Pompasının Projelendirilmesi	21
3.1.1. Isı yükü hesabı	21
3.1.2. Sistem elemanları ve otomasyon	25
3.1.3. Sondaj işlemi ve U-borusunun yerleştirilmesi	27
3.1.4. Isı pompası ünitesinin hazırlanması	38
4. ISIL DUYARLILIK TESTİ	41
4.1. IDT'in Çalışma Prensibi	41
4.2. IDT Ölçümü Verilerinin Değerlendirilmesi	45
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	53
5.1. Deneylerde Ölçülen Parametreler	53
5.1.1. Sıcaklık ölçümleri:	53
5.1.2. Debi ölçümleri:	54
5.1.3. Basınç ölçümleri:	54
5.1.4. Güç ölçümleri:	55
5.2. Deneylerin Yapılışı	55
5.2.1. Soğutma deneyleri	55
5.2.1.1. Soğutma çevrimi enerji analizi	58

5.2.1.2. Belirsizlik analizi	59
5.2.2. Isıtma deneyleri.....	74
5.2.2.1. Isıtma çevrimi için enerji analizi.....	76
5.2.2.2. Belirsizlik analizi	77
6. EKSERJİ ANALİZİ	91
6.1. Giriş.....	91
6.1.1. Ekserjinin tanımı	91
6.1.2. Ekserji çeşitleri.....	93
6.1.3. Ekserji kaybı	95
6.1.4. TKIP sisteminin ekserji analizi	95
6.1.4.1. Soğutma periyodu için ekserji analizi	99
6.1.4.2. Isıtma periyodu için ekserji analizi	108
7. SONLU ELEMENLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ.....	115
7.1. ANSYS Paket Programı	116
7.1.1 ANSYS programında işlem menüleri	118
7.1.2 ANSYS programı ana (main) menü	119
7.1.3 ANSYS programı çıkış (output) penceresi.....	119
7.2. Sondaj Kuyularındaki (Borehole) Sıcaklık Dağılımının Sayısal Analizi.....	120
7.2.1. Modelleme, malzemenin tanıtılması ve yükleme durumları.....	122
7.2.2. Malzeme tipinin belirlenmesi.....	122
7.2.3 Malzeme özellikleri ve ön hazırlık.....	122
7.2.4. Soğutma modunda elde edilen çözümler	123
7.2.5. Isıtma modunda elde edilen çözümler.....	129
8. YAPAY SİNİR AĞI VE UYARLAMALI BULANIK SİNİRSEL AĞI TABANLI MODELLEME.....	133
8.1. YSA.....	134
8.1.1. YSA'nın uygulama alanları.....	134
8.1.2. Sinir ağlarının biyolojik yapısı.....	135
8.1.3. Yapay sinir ağının tanımı ve modeli	136
8.1.4. YSA'nın yapıları ve çeşitleri.....	139
8.1.5. YSA'da öğrenme algoritmaları	141
8.1.6. YSA'nın temel özellikleri	144
8.1.7. YSA'nın avantajları	145
8.2. Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağlar (UBSA).....	146
8.2.1. UBSA mimarisi.....	147

8.3. YSA ve UBSA ile TKIP Sisteminin Performans Tahmini	150
8.3.1. Soğutma modu için YSA ve UBSA ile performans tahmini.....	151
8.3.2. Isıtma modu için YSA ve UBSA ile performans tahmini.....	159
8.4. Mevcut Modellerinin Literatürde Yapılan Çalışmalara Uyarlanması.....	166
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	171
KAYNAKLAR	174
ÖZGEÇMİŞ	184

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin çevrim şematiği.....	14
Şekil 2.2. Yer altı sulu ısı pompası sisteminin şematiği [84].....	17
Şekil 2.3. Düşey tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin şematiği [84]	18
Şekil 2.4. Yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin şematiği [84].....	19
Şekil 2.5. Yüzey sulu ısı pompası sisteminin şematiği [84]	19
Şekil 2.6. Sabit sütun kuyulu sistemin şematiği [84].....	20
Şekil 3.1. Şartlandırılan odanın bulunduğu konutun planı.....	21
Şekil 3.2. Proje bilgileri ekran görüntüsü	22
Şekil 3.3. Oda bileşenlerinin görüntüsü	22
Şekil 3.4. Isı kaybı çizelgesi ekran görüntüsü.....	23
Şekil 3.5. Isı kazancı hesabı ekran görüntüsü	24
Şekil 3.6. Toplam ısı kazancı ekran görüntüsü	25
Şekil 3.7. Sondaj çalışmasına başlamadan önceki sondaj alanın fotoğrafı	28
Şekil 3.8. Kazı aracının fotoğrafı.....	28
Şekil 3.9. Devridaim kuyusu.....	29
Şekil 3.10. Bentonitin çalışma suyuna eklenmesi.....	29
Şekil 3.11. Marn yapısının görüntüsü	30
Şekil 3.12. 30 metrelik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri	31
Şekil 3.13. 60 m’lik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri.....	31
Şekil 3.14. 90 m’lik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri.....	32
Şekil 3.15. Kangal halinde bulunan boruların görüntüsü.....	32
Şekil 3.16. U-borusu görünümü.....	33
Şekil 3.17. U-borusuna bağlanan ağırlığın görünümü	34
Şekil 3.18. Sondaj kısmın şematik görünüşü	34
Şekil 3.19. Toprağa yerleştirilen ısı çift problemlerinin görünümü.....	35
Şekil 3.20. Ucuna ağırlık takılan U-borusunun kuyuya bırakılmasının görüntüleri	35
Şekil 3.21. Bentonitin kuyu içerisinde oluşturduğu duvarın görüntüsü.....	36
Şekil 3.22. Bentonitin hazırlanışı ve kuyulara doldurulması	37
Şekil 3.23. Üç farklı kuyunun görüntüsü ve boruların kuyu içine bırakılması	38
Şekil 3.24. Ev içi ile toprak kısmının birleşiminin görünümü	39
Şekil 3.25. Su- antifriz karışımı boşaltma kabının görünümü	39
Şekil 3.26. Isı pompası sisteminin görünümü	40
Şekil 4.1. Isıl duyarlılık testi (IDT) cihazı	42

Şekil 4.2. IDT cihazı ve boyutları [90]	43
Şekil 4.3. (a) IDT cihazının akış şeması, (b) IDT cihazının kabin iç yapısının görünümü.....	44
Şekil 4.4. IDT ünitesinin şematik görünümü	44
Şekil 4.5. Sirkülasyon sıvısının toprak ile ısıl dengeye geldiği zaman aralığındaki sıcaklık değişimi.....	47
Şekil 4.6. Test süresince çevre ve su-antifriz sıcaklıklarının değişimi	47
Şekil 4.7. T_f 'nin logaritmik zamana karşı grafiği	48
Şekil 4.8. Sirkülasyon sıvısının toprak ile ısıl dengeye geldiği zaman aralığındaki sıcaklık değişimi.....	49
Şekil 4.9. Test süresince çevre ve su-antifriz sıcaklıklarının değişimi	49
Şekil 4.10. T_f 'nin logaritmik zamana karşı grafiği	50
Şekil 5.1. Data logger'in ve bilgisayarın birlikte görünümü.....	53
Şekil 5.2. Su-antifriz karışımının debisini ölçmek için kullanılan su saatinin görüntüsü.....	54
Şekil 5.3. Sistemdeki manometrelerin görünümü	54
Şekil 5.4. Sistemde kullanılan gerilim ve akım ölçerler	55
Şekil 5.5. Sistemin soğutma modu için şematik görünümü	56
Şekil 5.6. Su-antifriz karışımı ile havanın giriş ve çıkışının şeması	62
Şekil 5.7. Sondaj kısmın şematik görünüşü.....	63
Şekil 5.8. Farklı derinlikteki toprak sıcaklıkları ile dış hava sıcaklığının zamanla değişimi (01.07.2006 – 06.07.2006).....	64
Şekil 5.9. Çevre ve iç ortam sıcaklıkları ile su-antifriz sıcaklıklarının zamanla değişimi (01.07.2006 – 06.07.2006).....	65
Şekil 5.10. 30 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	66
Şekil 5.11. 30 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarının ve ısı yükünün zamanla değişimi.....	67
Şekil 5.12. 60 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	68
Şekil 5.13. 60 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi	69
Şekil 5.14. 90 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	70
Şekil 5.15. 90 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi	71
Şekil 5.16. Üç farklı kuyu derinliği için COP_{sis} değerinin zamanla değişimi	72
Şekil 5.17. Soğutma periyodunda sistemin uzun süreli performansı	73
Şekil 5.18. Deney düzeneğinin ısıtma modu için şematik görünüşü	75
Şekil 5.19. Su-antifriz karışımı ile havanın giriş ve çıkışının şeması	79
Şekil 5.20. Sondaj kısmın şematik görünüşü	80

Şekil 5.21. Farklı derinlikteki toprak sıcaklıkları ile dış hava sıcaklığının zamanla değişimi (10.11.2006-15.11.2006).....	81
Şekil 5.22. Çevre ve iç ortam sıcaklıkları ile su-antifriz sıcaklıklarının zamanla değişimi (10.11.2006-15.11.2006).....	82
Şekil 5.23. 30 m’lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	83
Şekil 5.24. 30 m’lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi	84
Şekil 5.25. 60 m’lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	85
Şekil 5.26. 60 m’lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi	86
Şekil 5.27. 90 m’lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi	87
Şekil 5.28. 90 m’lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün değişimi	88
Şekil 5.29. Isıtma periyodunda farklı kuyularda COP _{sis} değerinin zamanla değişimi	89
Şekil 5.30. Isıtma periyodunda sistemin uzun süreli performansı	90
Şekil 6.1. Soğutma periyodu için sistem üzerindeki ölçüm noktaları.....	100
Şekil 6.2. R-22 gazının fiziksel özellikleri.....	104
Şekil 6.3. 30 m’lik kuyu durumu için programın ekran görüntüsü.....	104
Şekil 6.4. Ekserji hesabı ekran görüntüsü.....	105
Şekil 6.5. Isıtma periyodu için sistem üzerindeki ölçüm noktaları	108
Şekil 7.1. ANSYS programı interactive menüsü	118
Şekil 7.2. Sondaj kuyusu içerisinde boşluk bulunmaması hali, (her iki borunun iç tarafında), [123]	120
Şekil 7.3. Sondaj kuyusu içerisinde boşluk bulunması hali, (360 ° sağ taraftaki boruda), [123].....	120
Şekil 7.4. Sondaj kuyusu içerisinde sıcaklık dağılımı (soğutma modunda), [125].....	121
Şekil 7.5. Sondaj kuyusu içerisinde sıcaklık dağılımı (ısıtma modunda), [125].....	121
Şekil 7.6. 30, 60 ve 90 m’lik kuyuların a) tamamının, b) A detayının sonlu eleman ağ sistemi	124
Şekil 7.7. Soğutma durumunda 30 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	125
Şekil 7.8. Soğutma durumunda 60 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	126
Şekil 7.9. Soğutma durumunda 90 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	127
Şekil 7.10. Soğutma modunda üç farklı kuyunun sıcaklık dağılımının birlikte görünümü	128
Şekil 7.11. Isıtma durumunda 30 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	129

Şekil 7.12. Isıtma durumunda 60 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	130
Şekil 7.13. Isıtma durumunda 90 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı	131
Şekil 7.14. Isıtma modunda üç farklı kuyunun sıcaklık dağılımının birlikte görünümü	132
Şekil 8.1. Biyolojik sinir hücresi [128]	136
Şekil 8.2. Biyolojik sinir sisteminin blok diyagramı	136
Şekil 8.3. Yapay sinir hücresinin modeli [128]	137
Şekil 8.4. Aktivasyon fonksiyonları	139
Şekil 8.5. İleri beslemeli ağ yapısı	140
Şekil 8.6. İki girişli ve iki kurallı Sugeno tip bulanık çıkarıma eşdeğer UBSA mimarisi	147
Şekil 8.7. YSA ve UBSA’da kullanılan blok diyagramların görünümü	150
Şekil 8.8. CGP10 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	152
Şekil 8.9. CGP10 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	153
Şekil 8.10. SCG6 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	154
Şekil 8.11. SCG6 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	154
Şekil 8.12. LM8 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	155
Şekil 8.13. LM8 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	156
Şekil 8.14. Söz konusu üyelik fonksiyonlarının örnek aralığı ile genlik değişimi	157
Şekil 8.15. Gauss2 üyelik fonksiyonu için TKIP sisteminin COP değerinin UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	157
Şekil 8.16. TKIP sisteminin COP değerinin YSA, UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	159
Şekil 8.17. CGP10 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	160
Şekil 8.18. CGP10 algoritması için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	161
Şekil 8.19. SCG6 topolojisi için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	162
Şekil 8.20. SCG6 için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	162
Şekil 8.21. LM8 topolojisi için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi	163
Şekil 8.22. LM8 için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	164

Şekil 8.23. Tri üyelik fonsiyonu için TKIP sisteminin COP değerinin UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	165
Şekil 8.24. TKIP sisteminin COP değerinin YSA, UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması	166
Şekil 8.25. Örnek model’de YSA ve deneysel çalışmadaki COP değişimi	168
Şekil 8.26. Örnek model’de UBSA ve deneysel çalışmadaki COP değişimi	169
Şekil 8.27. Örnek model’de YSA , UBSA ve deneysel çalışmadaki COP değişiminin gösterimi.....	170

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. U-borusunun ana karakteristikleri.....	33
Tablo 4.1. 60 m’lik kuyuda IDT sonuçları.....	48
Tablo 4.2. 90 m’lik sondaj kuyusu IDT sonuçları.....	50
Tablo 5.1. 2006 yılı için sistem ve çalışma şartlarına ait bazı parametrelerin ortalama değerleri	57
Tablo 5.2. Isı pompası ünitesi belirsizlikleri	61
Tablo 5.3. Elazığ ilinin 2006 yılı soğutma sezonundaki iklimsel verileri.....	61
Tablo 5.4. Elazığ ilinin 2006 yılı ısıtma sezonundaki iklimsel verileri.....	76
Tablo 6.1. Soğutma modunda 30 m’lik kuyu devredeyken belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	103
Tablo 6.2. Soğutma modunda 60 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	106
Tablo 6.3. Soğutma modunda 90 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	107
Tablo 6.4. Isıtma modunda 30 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	111
Tablo 6.5. Isıtma modunda 60 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	112
Tablo 6.6. Isıtma modunda 90 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları	113
Tablo 7.1. Analizi yapılacak olan malzemelerin özellikleri.....	122
Tablo 8.1. YSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri	156
Tablo 8.2. UBSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri	158
Tablo 8.3. YSA modelinde ısıtma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri	164
Tablo 8.4. UBSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri	165
Tablo 8.5. 25.07.2000 tarihli deney sonuçları	167
Tablo 8.6. 26.07.2000 tarihli deney sonuçları	167
Tablo 8.7. 29.07.2000 tarihli deney sonuçları	167
Tablo 8.8. 31.07.2000 tarihli deney sonuçları	167

SİMGELER

A_i	: Bulanık küme
B_i	: Bulanık küme
$a(.)$	: Etkinleştirme fonksiyonu
COP_{sis}	: Sistem performansı, (-)
COP_{cc}	: Carnot çevrimi soğutma performans katsayısı, (-)
COP_{ip}	: Isı pompası ünitesinin performans katsayısı, (-)
$C_{p,sa}$	: Su-antifriz karışımının özgül ısısı, (J/kg°C)
$C_{p,hava}$	: Havanın özgül ısısı, (J/kg°C)
cov	: Varyasyon katsayısı, Coefficient of variation
$\cos \varphi$	: Güç katsayısı, (-)
$\dot{E}_x$	: Sistemin toplam ekserjisi, (kW)
$\dot{E}_{x_{Fi}}$	: Fiziksel ekserji, (kW)
$\dot{E}_{x_{Ki}}$	: Kinetik ekserji, (kW)
$\dot{E}_{x_{PO}}$	: Potansiyel ekserji, (kW)
$\dot{E}_{x_{KM}}$	: Kimyasal ekserji, (kW)
$\dot{E}_{x_{i\dot{s}}}$	: Herhangi bir süreçteki iş ekserjisi, (kW)
$\dot{E}_{x_{isi}}$	: Isı transferinden dolayı meydana gelen ekserji, (kW)
$\dot{E}_{x_k}$	: Ekserji kaybı miktarı, tersinmezlik, (kW)
$\dot{E}_{x_{kazanılan,\dot{c}}}$	: Sistemden transfer olan tüm ekserji toplamı, (kW)
$\dot{E}_{x_{kullanılan}}$	: Herhangi bir işlem için gerekli olan ekserji giriş miktarı, (kW)
ε_1	: Enerji (birinci yasa) verimi, (%)
ε_2	: Ekserji (ikinci yasa) verimi, (%)
$E(k)$	: Hata fonksiyonu
f	: Çıkış değişkeni
$\dot{Q}_{sy}$	: Odanın soğutma yükü, (kW)
$\dot{Q}_{iy}$	: Odanın ısıtma yükü, (kW)
Q	: Uygulanan ısıl güç, (kW)
H	: Efektif kuyu derinliği, (m)
h	: Özgül entalpi
i	: Adım sayısı

I	: Akım, (Amper)
$\dot{I}$	: Tersinmezlik, (kW)
m_{sa}	: Su-antifriz karışımının debisi, (kg/s)
$\dot{m}_{hava}$	: Hava debisi, (kg/s)
$\dot{m}_g$	: Giren kütleli debi, (kg/s)
$\dot{m}_\varphi$	: Çıkan kütleli debi, (kg/s)
$\dot{m}_{soğ}$	: Soğutucu akışkan debisi (kg/s)
M	: UBSA mimarisi 3. katman etiketi
N	: UBSA mimarisi 4. katman etiketi
n	: Bağımsız data grubu içerisindeki örnek sayısı
p_i	: Sonuç değişkeni
q_i	: Sonuç değişkeni
r_i	: Sonuç değişkeni
R_b	: Sondaj deliğinin (borehole) ısı direnci, (K/(W/m))
R_{boru}	: Borunun ısı direnci, (K/(W/m))
r_b	: Kuyu yarıçapı, (m)
RMS	: Ortalama karekök, Root-mean squared
R^2	: Çoklu saptama katsayısı, Coefficient of multiple determinations
$\dot{S}_{\bar{u}}$	: Üretilen entropi miktarı, (kJ/kg°C)
$\dot{S}_{ist}$	: Isı yoluyla olan entropi miktarı, (kJ/kg°C)
$\dot{S}_{k\ddot{u}tle}$	: Kütle yoluyla olan entropi miktarı, (kJ/kg°C)
s	: Entropi, (kJ/kg°C)
$t_{ort,m}$	: m noktasındaki bir datanın ortalama değeri
$\bar{t}_{ort,m}$	: Bütün ölçülmüş data noktalarındaki ortalama değer
T_{sur}	: Kuyu ilk sıcaklığı, (°C)
T_f	: Giriş- çıkış ortalama akışkan sıcaklığı, (°C)
$T_{hava,\varphi}$	: Havanın buharlaştırıcıdan/yoğuşturucudan çıkış sıcaklığı, (°C)
$T_{hava,g}$	: Havanın buharlaştırıcıya/yoğuşturucuya giriş sıcaklığı, (°C)
$T_{yoğ}$	: Yoğuşturucu sıcaklığı, (°C)
T_{buh}	: Buharlaştırıcı sıcaklığı, (°C)
$T_{sa,\varphi}$	: Buharlaştırıcıdan toprağa giden su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C)
$T_{sa,g}$	: Topraktan buharlaştırıcıya giren su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C)
$T1$	: Odaya giden su sıcaklığı, (°C)

T_2	: Odadan dönen su sıcaklığı, (°C)
T_3	: TID'dan gelen su sıcaklığı, (°C)
T_4	: TID'a giden su sıcaklığı, (°C)
t	: Zaman, (s)
$\dot{W}_{\text{gerçek,g}}$	: Birim zamanda sisteme giren gerçek iş miktarı, (kW)
$\dot{W}_k$	: Kompresörün şebekeden çektiği güç, (kW)
$\dot{W}_{sp}$	: Sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç, (kW)
$\dot{W}_{bf}$	: Buharlaştırıcı fanının şebekeden çektiği güç, (kW)
$\dot{W}_{yf}$	: Yoğuşturucu fanının şebekeden çektiği güç, (kW)
w	: Belirsizlik (%)
w_{ij}	: Ağırlıklar, (-)
λ	: Isıl iletkenlik, (W/mK)
α	: Isıl yayılım katsayısı, (m ² /s)
γ	: Euler sabiti, (0.57)
U	: Gerilim, (Volt)
ψ	: Akış ekserjisi, (kJ/kg)
$\eta_{O,V}$	: Oransal verim, (-)
η_{II}	: İkinci kanun verimi, (-)
θ_i	: <i>i.</i> işlem elemanının eşik değeri
x	: Giriş değişkeni
y	: Giriş değişkeni
$y_{tah,m}$	: Tahmini değer
Σ	: UBSA mimarisi 6. katman etiketi

KISALTMALAR

ANFIS	: Adaptive Network-based Fuzzy Inference System
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerika Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği)
BM	: Bulanık Mantık
CGP	: Pola-Ribiere Conjugate Gradient Algoritması
EMBM	: Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü
EVO	: Enerji Verimlilik Oranı
FÜBAP	: Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
GA	: Genetik Algoritma
HKIP	: Hava Kaynaklı Isı Pompası
HP	: Beygir gücü, Horse Power
HVAC	: Isıtma Havalandırma İklimlendirme
IDT	: Isıl Duyarlılık Testi
KTH	: Demirdöküm firması programı
LM	: Levenberg–Marquardt Algoritması
MEVO	: Mevsimlik Enerji Verimlilik Oranı
MESH	: Ağ
MLBDA	: Çok Katmanlı Sondaj Deliği Alanı Tasarımı Algoritması
MLP	: Çok Katmanlı Algılayıcı
SCG	: Scaled Conjugate Gradient Algoritması
SSK	: Sabit Sütun Kuyulu
TB	: Toplam Belirsizlik
TBIP	: Toprak Bağlantılı Isı Pompası
TKIP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası
TID	: Toprak Isı Değiştiricisi
TRNSYS	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası İle İlgili Simülasyon Programı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UBSA	: Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağlar
US	: Uzman Sistem
ÜF	: Üyelik fonksiyonu
ÜFS	: Üyelik fonksiyon sayısı
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YASIP	: Yer Altı Sulu Isı Pompası
YSIP	: Yüzey Sulu Isı Pompası

ÖZET

Doktora Tezi

DÜŞEY BORULU TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASININ KONUT İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE MEVSİMLİK DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Hikmet ESEN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 183

Dünya enerji tüketiminin önemli bir kısmı konut ısıtma ve soğutmasından kaynaklanmaktadır. Isı pompaları yüksek kullanım verimlerinden dolayı, klasik ısıtma ve soğutma sistemlerine kıyasla birçok uygulamada tercih edilmekte ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan birisi olan toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemleri, genellikle ticari ve konutsal binaların ısıtılması ve soğutulmasında kullanılmaktadır. Yıl boyunca toprak sıcaklığının hemen hemen sabit (kararlı) olması, bu tip ısı pompalarının kullanımını ekonomik ve çevresel açılardan çok cazip kılmaktadır. Bu ısı pompalarında toprak, ısıtma için ısı kaynağı ve soğutma için de ısı kuyusu olarak kullanılır. TKIP sistemleri, ısıyı kışın topraktan binaya yazın da binadan toprağa transfer ederler.

Bu çalışmada, düşey sondaj kuyuları Elazığ'da ısıtılacak ve soğutulacak bir köy evinin bahçesinde üç farklı derinlikte (30, 60 ve 90 m) açılmıştır. Bu amaçla ilkin, toprak ısı değiştiricisinin bulunduğu jeolojik yapının ısı iletkenliğini ve ısı direncini tespit etmek için bir ısı iletkenlik testi yapılmıştır. Düşey tip tekli U-borulu toprak ısı değiştiricileri konutta bulunan ve ulusal imkânlarla imal edilen bir TKIP ünitesine bağlanmıştır. Sondaj derinliğinin ısı sistem performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, kurulan TKIP sisteminin ekserji verimleri, sondaj derinliğinin fonksiyonu olarak hem soğutma hem de ısıtma sezonu için belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, U-şekilli ısı değiştiricisi borusunu çevreleyen ve ısı iletken bentonit dolgunun ısı davranışı modellenmiştir. Bu maksatla, U-borulu toprak ısı değiştiricisi ile bağlantılı boru-dolgu oluşumundaki ısı transferini hesaplamak için sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Tezin son kısmında, kurulan TKIP sisteminin modellenmesi için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağları (UBSA) yöntemleri kullanılmış ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu yöntemlerde, su-antifriz karışımı ve yoğunlaştırıcı/buharlaştırıcıdaki hava giriş ve çıkış sıcaklıkları kullanılarak sistem performansı tahmin edilmiş ve UBSA'nın TKIP sisteminin modellenmesi için daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Soğutma ve ısıtma deneylerinin sonuçlarına göre, en yüksek sistem performansı, 90 m derinlikteki ısı değiştiricili sistem için elde edilmiştir. Bu sistemlerde, sondaj kazı maliyetleri azaltılabilirse ve ısı pompası ekipmanları tamamen ulusal teknoloji ile üretilebilirse, ülkemiz için büyük yararlar sağlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Toprak kaynaklı ısı pompası, deneysel performans, ısı duyarlılık testi, sonlu eleman metodu, yapay sinir ağları, uyarlamalı bulanık sinirsel ağlar.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF SEASONAL BEHAVIOUR OF A VERTICAL GROUND SOURCE HEAT PUMP USED IN RESIDENTIAL AIR CONDITIONING SYSTEMS

Hikmet ESEN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2007, Page: 183

A significant section of world energy consumption is attributable to domestic heating and cooling. Heat pumps are preferred and widely used in many applications due to their high utilization efficiencies compared to conventional heating and cooling systems. Ground source heat pump (GSHP) systems are usually used for heating or cooling of commercial and residential buildings. Because the temperature of the soil is almost stable during the year, the use of these types of heat pumps (HPs) is very attractive economically and environmentally. These HPs can use the soil as either a heat source for heating or as a heat sink for cooling. Using this resource, the GSHP transfers heat from the soil to the building in winter or from the building to the soil in summer.

In this study, vertical drilling of borehole was performed for three different depths (30, 60, and 90 m) in garden of a heated and cooled village house in Elazig, Turkey. First, a thermal response test for determining the thermal conductivity and thermal resistance of the geologic formation, where the vertical ground heat exchangers were buried, was carried out. The vertical type single U-borehole heat exchangers were linked with a GSHP unit which was placed in a house and manufactured with the national facilities. In this way, this house was both heated and cooled. The effect of the depth of borehole coupled to heat exchanger on the thermal system performance was experimentally investigated. Furthermore, the exergetic efficiencies of the GSHP system were determined as a function of the borehole depth for cooling and heating seasons. Besides, our goal is to model the behaviour of thermally conductive bentonite grouts surrounding U-shaped pipes in this work. For this aim, finite element analysis was performed to evaluate the heat transfer in the complete pipe-grout formation associated with U-tube ground heat exchangers. In the last chapter of the thesis, a comparison of artificial neural network (ANN) and adaptive neuro fuzzy inference systems (ANFIS) is presented for modelling the GSHP. In this section, the system performance was predicted by using water-antifreeze solution and air (condenser inlet and outlet) temperatures. In conclusion, ANFIS for the quantitative modeling of GSHP systems has been shown as more suitable estimation method.

According to the results of the cooling and heating experiments, it is proved that the best performance of system has been obtained for the heat exchanger system with depth of 90 m. If the drilling cost is reduced and heat pump equipments could be produced by the national technology completely, these systems will provide great benefits in our country.

Key Words: Ground source heat pump, experimentally performance, thermal response test, finite element method, artificial neural network, adaptive neuro fuzzy inference systems.

1. GİRİŞ

Ekonomik gelişme ve hızlı kentleşmeye bağlı olarak ülkemizde enerji gereksinimi giderek artmaktadır. Özellikle de konutların iklimlendirilmesi konusunda önemli güçlükler söz konusudur. Petrol, kömür ve odunun hem hızla tükenmekte olması hem de fiyatlarının artması bu zorluklardan bazılarıdır. Enerji kaynaklarının sürekli azaldığı ve giderek pahalı olduğu günümüzde ısı pompalarının kullanılması petrol ve petrol kaynaklı enerji kaynaklarında dışa bağımlı olan ülkemizde, çevre sağlığını hiçbir şekilde bozmayan yapıları nedeniyle diğer ısıtma ve soğutma sistemlerine alternatif olabileceklerdir.

Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (TKIP) sistemleri, toprağın içindeki sıcaklığın kararlı değişmesi ve soğuk iklimlerde performansını yüksek seviyede tutması nedenleriyle enerjinin kullanımında daha etkili sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden birçok ülkede TKIP sisteminin kullanımı hükümetler tarafından desteklenmektedir.

Mevcut çalışmada, Elazığ'ın Baskil ilçesi Sultanuşağı köyünde bulunan 56 m²'lik üç odalı bir evin bahçesine yerleştirilmiş olan üç farklı derinlikteki (30, 60 ve 90 m) dikey tekli tip toprak ısı değiştiricili (TID) U-boruları TKIP ünitesine bağlanarak bir ısıtma sistemi kurulmuştur. Bu tür sistemlerin tasarımında önemli olan toprak kısmının ısı duyarlılık testi (IDT) 60 ve 90 m'lik kuyular için yapılmıştır. Enerji analizi, yaz ve kış şartlarında yapılmış olup ölçülen deneysel veriler kullanılarak sistemdeki her bir elemanın sistem performansı (COP_{sis}) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ulusal imkânlarla üretilen bu TKIP sisteminin uluslararası standartlara göre performans testi yapılmış, elde edilen COP_{sis} değerlerinin bu standartlara uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca ekserji analizi de yapılarak ısıtma sisteminin ekserji verimlilikleri hesaplanmıştır. Sistemin toprak kısmındaki sondaj deliği içerisindeki sıcaklık dağılımı, hem ısı atma hem de ısı çekme modlarına göre sayısal olarak ANSYS paket programı kullanılarak hesaplanmıştır. Tezin son kısmında yapay zeka tekniklerinden son derece yaygın olarak kullanılan YSA ve UBSA ile sistem modellemeleri yapılmıştır. Literatür verileri ile de kıyaslanan modellemelerin son derece doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Toplam 8 bölümden oluşan tezin bölümleri aşağıda özetlenmiştir:

1. bölümde, bir mekânı hem soğutmak hem de ısıtmak için kurulan TKIP sisteminin önemi vurgulanmış ve konu ile ilgili geniş bir literatür araştırması verilmiştir.

2. bölümde, TKIP sistemlerinin tanıtımı yapılmış ve sınıflandırılmıştır.

3. bölümde, kurulan TKIP sisteminin tasarımına ilişkin bilgiler verilmiş ve ısı pompasının kurulduğu odanın ısıtma ve soğutma yükü hesaplanmıştır. Tüm sistem elemanları ve otomasyonu anlatılmıştır. Deneysel çalışmanın önemli aşamasını oluşturan sondaj işleminin

ve U-borusunun yerleştirilmesi detaylı olarak verilmiş ve fotoğrafları gösterilmiştir. Bölümün son kısmında ise, ısı pompası ünitesi tanıtılmıştır.

4. bölümde, TKIP sistemlerinin TID'si kısmının doğru tasarımı esas olan ısı duyarlılık testi (IDT) anlatılmıştır. Bu testler, 60 ve 90 m'lik kuyular için gerçekleştirilmiştir. Elde ettiğimiz ısı iletkenlik ve ısı direnç değerleri literatür ile kıyaslanmıştır.

5. bölümde, hem soğutma hem de ısıtma modu için elde edilen deneysel verilerin günlük ve mevsimsel değişimi grafikler halinde verilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalar için önemli olan belirsizlik analizi de yapılmıştır.

6. bölümde, uygulanan sistem için yapılan ekserji analizi kısaca anlatılmıştır. Bunun için ekserji bağıntıları türetilerek sistemin ekserji verimlikleri hesaplanmıştır.

7. bölümde, ANSYS paket programı kullanılarak hem soğutma hem de ısıtma moduna göre kuyu etrafındaki sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Elde edilen teorik sonuçların deneysel sonuçlarla uyum halinde olduğu saptanmıştır.

8. bölümde ise, kurulan TKIP sisteminin performansı yapay zeka yöntemlerinden olan Yapay Sinir Ağları ve Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağı tabanlı modellemeler kullanılarak tahmin edilmiştir.

Bu çalışmada, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (FÜBAP) tarafından 1153 nolu proje kapsamında ve ayrıca çalışmanın bir kısmında Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 106Y188 nolu proje kapsamında maddi destekler alınmıştır.

1.1. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

TKIP endüstrisi ülkemiz için oldukça yenidir. Son birkaç yıldır, bazı şirketler yurt dışından ithal ettikleri TKIP'ları ülkemiz piyasasına sokmak için yoğun çaba harcamaktadırlar. Bununla beraber, ülkemizde kurulan TKIP'ların sayısı, yurt dışında kurulanlarla kıyaslanmayacak ölçüde oldukça azdır. TKIP'lar üzerine tarihten günümüze kadar yapılan bazı önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

TKIP'lar, ilk olarak 1912 yılında İsviçre patenti ile tanıtılmıştır. Daha sonra, termodinamik açıdan önemi, ısı kaynağı olarak toprağa gömülen metal serpantinler içinde salamura dolaştırılarak, 1940'lı yıllarda çarpıcı şekilde gösterilmiştir. Serpantin korozyon sorunları, toprak serpantinlerini kullanışsız kılmıştır ve hava kaynaklı ısı pompası (HKIP)

sistemlerinin gelişimini zorlamıştır. Daha sonraları, plastik borular kullanılarak, korozyon sorunlarının üstesinden gelinmiştir ve TKIP'ların üzerine araştırmalar hızlanmıştır [1].

Catan ve Baxter [2], kuzey iklim uygulamalarında TKIP'in ekonomik açıdan optimum analizini incelemişlerdir. Pittsburgh'da bulunan 167 m²'lik bir ev için, yatay tip TID'si olan su kaynaklı ısı pompasının yapım – kullanım maliyeti (life – cyle cost) 7 yıllık ekonomik ömür için minimize edilmiştir. Çalışmada, geleneksel HKIP sistemlerine göre, optimize edilen ısı pompasının geri ödeme süresi 3 yıldan düşük bulunmuştur.

Hughes vd. [3], New York şehrinin yakınlarında konutlara yönelik TKIP'in teknik ve ekonomik potansiyelini değerlendirmek amacıyla, çok amaçlı bir gösteri projesinden elde edilen sonuçları vermişlerdir. Bu çerçevede, 1982–1984 yılları arasında ısıtma/soğutma performansları ve kullanma suyu sıcaklıkları ölçülmüştür.

Franck ve Berntsson [4], İsveç'te yürütülen büyük bir araştırma programı doğrultusunda, 10 - 40 m uzunluklardaki düşey boruları kullanarak bir TKIP sistemi kurmuşlardır. Bu sisteme güneş enerjisi takviyesi yapılarak performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Fleming [5], Shanghai'deki (Çin) bir ticari ofis binası (net iklimlendirme yüzey alanı 3600 m², ısıtma yükü 65.7 ton ve soğutma yükü 128.6 ton) için 130 ton'luk bir jeotermal ısı pompası sistemini tasarlayarak işletilmesini gerçekleştirmiştir.

Eskilson [6], sondaj kuyularında ısı çekilmesinin analizi başlıklı kitabında bu konuda yaptığı çalışmaları özetlemiştir. Derin sondajlarda iletimle ısı çekilmesinin analitik modellenmesi yapılmış ve boyutlandırma kuralları verilmiştir. Isıl duyarlılık testleri gerçekleştirilmiştir.

Kavanaugh [7], güney iklimlerde toprak ve su kaynaklı ısı pompalarının tasarımına yönelik esasları vermiştir. Bu sistemlerin nasıl daha verimli ve güvenilir olacağı açıklanmıştır. Ayrıca, geleneksel ısıtma sistemleriyle kıyaslanmış; esneklik, performans ve ekonomi bakımından bu sistemlerin daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

Martin [8], yatay tip TID'si olan bir ısı pompası sisteminin tasarlanmasında etkin olan parametrelerin değişimini incelemek üzere teorik ve deneysel çalışma yapmıştır. Konutlar için 3 ton soğutma yüküne sahip bir ısı pompasının performansını ve enerji sarfiyatını tayin etmek bir bilgisayar programı geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Oklahoma'daki iki konut için kıyaslanmıştır. Ayrıca, ekonomik bakımdan optimum tasarımı belirlemek için bir ekonomik analiz yapılmıştır.

Mei ve Baxter [9], kurmuş oldukları deney düzeneği ile doğrudan genleşmeli TID'in uygulamada karşılaşılan yarar ve sakıncalarını ortaya koymuşlardır.

Safemazandarani vd. [10], doğrudan genleşmeli bir TKIP sisteminin simülasyonunda bir matematiksel model geliştirmişlerdir. TID'in tasarımında etkin parametreler için deneyler yapılmıştır.

Kavanaugh [11], ısı kaynağı olarak nehir suyunun kullanıldığı su/hava ısı pompalarının analizini yapmıştır. Bu çalışmada, ısı pompasının seçimi, pompalama sistemleri, boru hattı yerleşimi ve nehir boyut/karakteristikleri ile ilgili uygulama sonuçları verilmiştir.

Sulatisky ve Van der Kamp [12], Kanada'da (Saskatchewan) konutlar için beş adet TKIP'in performansını araştırmışlardır. 5-8 yıl arasında kullanılan ısı pompası sistemlerinin, sadece iki yıllık bir süre için performans sonuçları yorumlanmıştır.

Sorour vd. [13], toprak içerisinde donmayı önlemek amacıyla kullanılan ısıtma elemanlarının toprak kısmında yaptığı etkileri analitik olarak incelemiştir. İki boyutlu sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Farklı sıcaklık profilleri elde edilmiştir.

Kavanaugh [14], güney iklimlerde düşey TKIP sistemlerinin kullanılabilirliğini ve işletme karakteristiklerini belirlemek üzere bir deney yapmıştır. Alabama'daki 150 m²'lik bir konutta kurulan ısı pompasının soğutma ve ısıtma performansları göz önüne alınmıştır.

Meloy [15], bir iş mekanının indirekt kuyu soğutması olan sisteminin kuyu kaynaklı ısı pompası sistemine dönüştürülmesi üzerine çalışmış ve dönüşüm esnasında karşılaşılan sorunları araştırmıştır. Bu dönüşümle, bir yılda %22 dolaylarında enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Rafferty [16], yer altı suyu sıcaklığı 22 °C olan 360 ton (1266 kW)'luk ve yer altı suyu sıcaklığı 13 °C olan 156 ton (549 kW)'luk, iki farklı yer altı su kaynaklı ısı pompası sisteminden elde edilen verileri yorumlamıştır. Tasarım yapılarak, sistemin işletme akışı ve iyileştirilmeleri verilmiştir. Ayrıca, yer altı suyunun özellikleri kontrol edilmiştir. Isı pompasının kapasite kontrolünün ve sistemin devreye girip çıkmasının önemli hususlar olduğu açıklanmıştır.

Hatten [17], Amerika'da Portlan/Oregon eyaletindeki bir binaya (bugün The Commonwealth Building olarak bilinmektedir) yer altı sulu ısı pompasının ilk ticari montajını yapmıştır. Isı pompasından elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Sistemin daha önceki çalışmaları da kontrol edilerek, önemli olan işletme ve bakım konuları açıklanmıştır.

Jacovides ve Mihalakakou [18], bir enerji kaynağı olarak soğutma ve ısıtma için yeraltına döşenmiş boruları kullanmışlardır. Yeraltındaki boru sistemlerinde aynı anda ısı ve kütle transferini tanımlayarak, deneysel datalardan bir algoritma geliştirmişlerdir.

Kangas [19], toprağa inen düşey boruları kullanarak ısı pompaları için toprağın termohidrolik analizini yapmıştır. Bilgisayar simülasyonu ile ısı kaynağı olarak toprağın kullanılması durumunda analiz yapılmıştır. 3 boyutlu THETA denilen bir model kullanılmıştır. Sonuçta, topraktan ısı çekme sisteminin davranışı üzerinde farklı jeolojik ve ısı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Toprağın sıcaklığının sistem performansı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu vurgulanmıştır.

Petit ve Meyer [20], Johannesburg’da düşey TID’li TKIP ile HKIP’in ekonomik kıyasını yapmışlardır. Ayrıca TKIP’in yatırım maliyetleri ve optimum sondaj deliği uzunluğu hesaplanmıştır. İşletme maliyetlerinin çıkarılması için, aylık ısıtma-soğutma kapasiteleri ve performans değerleri hesaplanarak, TKIP sisteminin HKIP sisteminden daha büyük oranda ekonomik olduğu bulunmuştur.

Leong vd. [21], üç farklı toprak türü (kum, alüvyonlu verimli toprak ve alüvyonlu killi toprak) için beş değişik doyma derecesinde (%0, %12.5, %25, %50, %100) bilgisayarda simülasyon yapmışlardır. TKIP performansının büyük ölçüde toprağın nem içeriğine ve toprak türüne bağlı olduğu, topraktaki nem azalışının TKIP’in performansını düşürdüğü, bu durumda toprak nem içeriğinin mümkün olduğunca kuru toprak şartlarının üzerinde tutulması gerektiği, toprağın nem doygunluğu %25’in üzerine çıktığında TKIP’in performansının büyük oranda iyileştiği, doygunluğun %50’in üzerine çıkması durumunda ise TKIP’in performansının etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

Phetteplace ve Sullivan [22], TID ve soğutma kulesinin birlikte kullanıldığı (böylece gerekli TID uzunluğunun azaltıldığı) hibrit bir ısı pompasının performansını incelemişlerdir. İkisi ısıtma ve ikisi soğutma sezonu olmak üzere, yaklaşık 22 aylık bir süre boyunca performans ölçümleri yapmışlardır.

Den Braven [23], ABD’deki TKIP sistemlerinin TID’lerinde kullanılan antifrizlerin kullanılabilirliğini inceleyerek, tablo halinde vermiştir. ABD’deki eyaletlerin hemen hemen yarısında, TKIP sistemleri için antifriz malzemelerini içine alan herhangi bir kural veya öneri olmadığı belirtilmiştir.

Spilker [24], düşey TID’de (dört farklı delik çapı yerleşiminde) kullanılan farklı dolgu malzemelerinin etkisini ısı iletkenlik testi yaparak açıklamıştır. Düşey TID’nin tasarımı üzerine çalışılmıştır. Düşey TID’in delik çapının, boru tipinin, dolgu malzemesinin ve toprağın ısı özelliklerinin; ısı değiştiricisinin sıcaklığına ve tasarımına önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır. 6½” (16.51 cm)’lik delik çapında, kum yerine, standart harcın (grout) kullanılmasının, gerekli ısı değiştiricisi uzunluğunu %49 azalttığı deneysel olarak bulunmuştur.

Kavanugh [25], bilinen TKIP sistemleri için bağlantı elemanları ve boru hatlarındaki basınç kaybı ile ilgili diyagramları vererek, boru hattı tasarımını gerçekleştirmiştir.

Salah El- Din [26], Arabistan'da toprak sıcaklığının derinliğe bağlı olarak periyodik değişimini kullanarak iki yaklaşım geliştirmiştir. Bunlar; Sinüs dalgası ve Fourier serisi yaklaşımıdır. Bu çalışmada, toprağın yutuculuğu ve havanın özgül nemi arttığında toprak içerisindeki ısı akısı değerinin ve toprak sıcaklığının arttığı, buharlaşma oranı ve rüzgar hızı arttığında ise toprak içerisindeki ısı akısı değerinin ve toprak sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir.

Piechowski [27], yatay tip TID'in dizaynının daha doğru ve hesaplamalarının daha kolay olması için simülasyonlar yapmıştır. Bu çalışma, toprak – boru yüzeyi gibi daha büyük sıcaklıkların olduğu ve nem hareketinin fazla olduğu yerlerde daha kolay çözüme erişmek için yapılmıştır. Analitik çalışmada, implicit ve explicit yöntem kullanılmış ve bu iki yöntemin kıyası yapılmıştır. Sonuçta, implicit formülasyonun bu tür çalışmalarda daha iyi sonuç verdiği iddia edilmiştir.

Tarnawski vd. [28], yüksek sıcaklıklardaki toprağın ısı iletkenliğinin tahmini için iki metod geliştirmişlerdir. Modellerden birincisi olan Vries modeli ile toprağın 30, 50 ve 70 °C sıcaklıkları için çok uygun tahminler elde edilmiş, 90 °C için ise orta derecede tahminlere varılmıştır. İkinci model olan Gori modelinde, toprağın 30 ve 50 °C' deki sıcaklıkları için uygun değerlere varılmıştır. İkinci modelde en iyi tahminler, toprağın tam kuru hali için elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıktaki toprağın ısı ve nem taşınımının analizinde birinci model tavsiye edilmiştir.

Rees vd. [29], yer ile temasta olan yapıların ısı performansları üzerinde toprak ısı transferinin etkilerini incelemişlerdir.

Bernier [30], düşey TID'a sahip TKIP sistemi için ısı pompasının yıllık performansını simüle etmiştir. Klasik silindirik ısı kaynağı çözümü geliştirilerek yük birleşimi bulunmaya çalışılmıştır. Daha sonra uygun toprak ısı transfer denklemleri çözülmüş ve ısı pompası performansı kısa süreli simülasyonlarla hesaplanmıştır.

Pahud ve Matthey [31], yaptıkları çalışmada yerinde yapılan ısı duyarlılık testi ile farklı dolgu malzemelerinin kullanıldığı düşey tip çiftli U-borulu düşey ısı değiştirgeçlerinde bu dolgu malzemelerinin ısı performanslarını kıyaslamışlardır.

Yavuztürk [32], Lincoln'de inşa edilen bir ilkokuldan alınan gerçek işletimsel bilgiyi kullanarak kısa zaman adımlarında elde edilecek sıcaklık modelini geliştirmiştir. Sistem, düşey TID'dir. Bu çalışmada, akışkanın pompaya giriş sıcaklığının sistemin enerji tüketimi üzerine

olan etkisi de incelenmiştir. Kurulan sistemin enerji tüketimi, pompa akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak verilmiştir.

Kavanaugh ve McInerny [33], alanı 6700 m² olan bir okulun TKIP sisteminin değişik TID boru şekillerini ve dört farklı pompa için durumlarını incelemişlerdir. Merkezden dışa doğru yayılan sistemde tekli halkalar, her bir tabaka için dolaşım pompaları ve üç merkezi sistem (değişken hızlı, sabit hızlı, birincil–ikincil halka şeklinde pompalar) ele alınmıştır. Bu dört pompa türü için yıllık enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Sırasıyla değişken hızlı pompanın, sabit hızlı pompanın ve birincil – ikincil sistemdeki pompanın yıllık tüketimi, 18800, 108600 ve 65500 kWh bulunmuştur.

Parent [34], TKIP projesi için uygulanabilir bir yöntem kullanarak simülasyon modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu model, TKIP sistem simülatörü ve yapı yükünden oluşturulmuştur. Isı pompası sisteminin performansının ve TID şeklinin tahmini için, yapının yıllık enerji kullanımı göz önüne alınmıştır. Model'in ticari, mesken, kurumsal ve endüstriyel yapılar için düşey TID, yatay TID ve yer altı su sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Yenilenebilir enerji projelerine destek sağlamak amacıyla Kanada hükümeti tarafından yazılım programları içine tablolama programları konularak algoritmalar geliştirilmiştir. Yazılım programından çıkan bilgilerle, TID modelinin çıktıları kıyaslanmıştır. Kıyastan çıkan sonuç, ticari dizayn yazılımı tarafından tahmin edilen ortalama değerler ile TID hesaplamalarının iyi bir yaklaşım gösterdiğiidir.

Sodha [35], yer ve yer altı yapılar arasındaki dinamik ısı transferi için rastgele zaman aralıklarında simülasyon yapmıştır. Deneysel datalar ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. Sodha [36], yaptığı diğer bir çalışmada yer ve yer altı yapılar arasındaki bölge için daha kısa zaman adımlarında, değişik boyutlarda değişik malzemelerle yeni simülasyonlar yapmıştır.

De Swardt ve Meyer [37], belediye şehir şebeke suyu sirkülasyonuna bağlı dönüşümlü TKIP sistemini geleneksel HKIP sistemi ile deneysel ve teorik olarak performans yönünden kıyaslamışlardır. Sonuçta, özellikle ısıtma modunda belediye suyu sirkülasyonun iyi bir ısı kaynağı olduğu gözlemlenmiştir.

Mihalakakou [38], toprak yüzeyi sıcaklığının günlük ve yıllık değişiminin tahmini için iki yaklaşım sunmuştur. Toprağın yüzey sıcaklığının, toprak ile temas halinde bulunan yapıların ısı performansının hesaplanmasının yanında toprak – hava ısı değiştiricisinin veriminin tahmini için de önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşımlar, Deterministic model ve Neural Network'dur. Sonuçta, bu iki modelin toprak yüzey sıcaklığı dağılımını bulmada çok doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bi vd. [39], düşey spiral şeklindeki TID etrafında iki boyutlu toprak bölgesi olarak öncelikle kontrol hacim metodunu kullanmış, toprak sıcaklık dağılımını teorik olarak modellemişlerdir ve daha sonra deneysel sistem kurularak deneysel veriler elde edilmiştir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler karşılaştırılmıştır. TKIP sisteminin ısıtma yükünün TID'ın civarındaki toprak sıcaklığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın TKIP sistemlerinin TID dizaynı için yol gösterici olduğu savunulmuştur.

Zeng vd. [40], jeotermal ısı değiştirgeçlerinde sondaj kuyuları için bir sonlu çizgisel kaynak modeli oluşturmuşlardır.

Sutton vd. [41], katmanlaşmış jeolojik rejimlerde kurulmuş olan düşey borulu ısı değiştirgeçleri için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma çok katmanlı sondaj deliği alanı tasarımı algoritması (MLBDA) olarak adlandırılmıştır.

Sanner vd. [42], Avrupa'daki TKIP ve yer altı ısı enerji depolama sistemlerinin güncelliğini tartışmışlardır. 10 Avrupa ülkesinde son on yılda kurulu olan TKIP sistemlerinin adedi belirtilerek bu sayının hızla arttığı gösterilmiştir. Bu tür sistemlerdeki ticaret fırsatları ve sınırlamaları vurgulanmıştır.

Lund [43], U-borusu ısı değiştirgeçlerinin kullanımı başlıklı çalışmada, ABD'nin kuzey batısındaki yerleşim alanı Oregon (Klamath Falls)'da kurulu olan 500 adet'i aşkın sistemin bulunduğunu ve Türkiye ile Yeni Zelanda'da da az sayıda tekli jeotermal kuyuların evlerin, okulların, binaların ihtiyaçlarını gidermek için kurulduğunu belirtmiştir.

Sanner vd. [44], Almanya'nın merkezi bölgesinde çok büyük jeotermal ısı pompası alanları üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmada, ticari yapılar için TKIP sistemlerinin daha önceki gelişmeleri özetlenmiş, bir çok detay ve ortaya çıkan problemler vurgulanmıştır.

Lam ve Chan [45], otel uygulamaları için su-su ve hava-su ısı pompalarının enerji performanslarını incelemişlerdir. Hong Kong'daki iki otel üzerinde araştırma yapılmıştır. Genellikle sistem performansları 1.5-2.4 arasında hesaplanmıştır.

Doherty vd. [46], Nottingham Üniversitesi'nde ekonomik ev (Eco House) diye tarif ettikleri bir yere kurulan TKIP sistemini test etmişlerdir. Çeşitli tip'te TID'i konfigürasyonları denenerek karşılaştırma yapılmıştır. Bunlar, slinky (spiral), düşey ve yatay TID'leridir.

Roth vd. [47], Latin Amerika'da kurulan bir TKIP sistemindeki sondaj deliği ve etrafındaki toprağın ısı iletkenliğini saptamışlardır. Bu çalışmada Şili ve Arjantin'den gelen bir çalışma grubu ile işbirliği yapılarak çeşitli bölgelerdeki sondaj deliği bölgesi ısı iletkenliği çalışmaları detaylandırılmıştır.

Bi vd. [48], teorik ve deneysel olarak düşey kıvrımlı kangal borulu ısı değıştirgeçli güneş-toprak kaynaklı ısı pompasını incelemişlerdir. Güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası, TKIP sistemi ve güneş-toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri karşılaştırılmıştır.

Diao vd. [49], yer altı su hareketine maruz toprak ısı değıştirgecindeki ısı transferini etüd etmişlerdir.

Kyriakis vd. [50], TID'nin maksimum ısı yükü üzerinde yoğunlaşmışlardır. Toprağın ısı yükünün, toprağın ilk sıcaklığına ve uygulama süresine bağı olduğu savunulmuştur.

Sanner vd. [51], dünyada yapılan tüm ısı duyarlılık testlerinin kısa tanımını, temel teorisini, tarihsel gelişimini ve tüm uygulamalarını özetlemişlerdir.

Trillat-Berdal vd. [52], güneş kolektörleri ile birleştirilmiş bir TKIP sisteminin deneysel çalışmasını sunmuşlardır. 180 m²'lik özel bir konutun ısıtılması için kurulan TKIP sisteminin güneş sistemi ile takviye edildiğinde nasıl bir iyileşme sağlandığı verilmiştir.

Nagano vd. [53], TKIP sistemlerinin performans tahmini ve tasarımı için yeni gelişmeleri irdelemişlerdir. Çalışmalarında Sappora'da bir evin bahçesinde ısı duyarlılık testi yapılmıştır. TKIP sisteminin, CO₂ emisyonu bakımından diğer geleneksel ısıtma sistemleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

Lim vd. [54], TID tasarımında toprağın ısı özelliklerinin bilinmesinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, sondaj deliği etrafındaki yer suyu akışının ve sondaj deliği içindeki doğal taşınımın etkisini içeren parametrelerle toprağın ısı iletkenliği yerinde incelenmiştir.

Florides ve Kalogirou [55], Kıbrıs'ta kurulan düşey borulu TKIP sistemi üzerindeki deneysel verilerden U-borusu dolgusunun ısı performansını yerinde saptamışlardır. Sondaj deliği boyunca toprağın ısı iletkenliğini 1.605 W/mK, sondaj deliğinin ısı direnci de 0.257 K/(W/m) olarak hesaplanmıştır.

Signorelli vd. [56], sondaj deliğine ısı duyarlılık testi yaparak nümerik değerlendirme yapmışlardır. U-borusu ısı değıştirgecinin tasarımında anahtar parametrenin ısı iletkenlik olduğu vurgulanmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman nümerik modeli kurularak test sırasındaki heterojen alt yüzey şartları ve yer altı su hareketlerinin etkileri incelenmiştir.

Phetteplace [57], jeotermal ısı pompaları başlıklı çalışmasında detaylı bir şekilde jeotermal ısı pompalarının genişletilmiş uygulamalarını anlatmıştır. TKIP sistemlerinin başlıca yaygın tipleri, düşey U-tip TKIP sistemlerinin tasarım konuları, ekipmanlar ve TKIP sisteminin uygulamalarının sonuçları ve değerlendirilmesi verilmiştir.

Michopoulos vd. [58], Kuzey Yunanistanda bir TKIP sisteminin üç yıllık işletme deneylerinin sonuçlarını sunmuşlardır. DAQ denilen bir sistemle Yunanistan’da kurulan bu en büyük sistem üç yıl boyunca gözlemlenmiştir ve sonuçta bu sistemin enerji talebinin diğer geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine nazaran daha düşük olduğu bulunmuştur.

Konu ile ilgili olarak ülkemizde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Hepbaşlı, “Isı Pompası Sistemleri ve Konut Isıtılması” başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, ısı kaynağı olarak topraktan yararlanarak, toprak – su ısı pompası tesisi ile, konut ısıtılması üzerine çalışmıştır. Projelendirmesi yapılan tek katlı ve TID’in yerleştirilmesine uygun, yeterli toprak alanı bulunan konuta döşemeden ısıtma metodunu uygulamıştır. Bu çalışmada; hem yatay hem de düşey TID tasarımı yapılmış ve bu iki farklı yöntemin birbirine göre kıyası verilmiştir [59].

Babür ve Oskay, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliğinde var olan cihazları kullanarak toprak hava arasında çalışan bir ısı pompasının tasarımını ve yapımını gerçekleştirmişlerdir. İki devreden oluşan bir ısı pompası kurularak deneysel incelemeler yapılmıştır. Su – antifiriz karışımı salamurayı, toprak altına yatay olarak döşenmiş bakır borulardan geçirerek, 1985 – 1986 yılları arasındaki kış ayları boyunca bir hacmin ısıtılmasını sağlamışlardır. Toprak altındaki boru demeti 10 m uzunluğunda ve 5/8” çapında bakır borudan yapılmıştır. Topraktan soğurulan ısı gücü ölçülmüş ve bir kuramsal modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunların dışında toprağın çeşitli bölgelerine yerleştirilen sıcaklık seziciler ile, toprağın aylara ve ısıtma ihtiyacına göre sıcaklık değişimleri tespit edilip grafiksel olarak gösterilmiştir. Isıtma mevsiminde değişen iklim koşullarında ve değişen salamura kütle debisiyle toplam 44 deney yapılmıştır. Topraktan soğurulan ısı gücü ölçülmüş ve teorik modellerin tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Sistemin etkinlik katsayısı Ekim ayında 1.4, Şubat ayında bir miktar gerileyip 1.1 değerini almış ve Mart – Nisan aylarında ise tekrar yükselerek 1.3 değerine ulaşmıştır [60].

Ataman [61], İstanbul Teknik Üniversitesinde “Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Tasarımı” başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, İstanbul Göztepe’de inşa edilen bir konutun TKIP ile ısıtılmasını ele almıştır. Konutun ısı kaybı derece-gün metoduyla hesaplanarak uygun ısı pompası seçilmiştir. Seçilen bu ısı pompasının çalışma şartlarına uygun olarak, TID’ in boyutlandırılması yapılmıştır. TID boyutlandırılırken, topraktaki sıcaklık değişimi, Kelvin Çizgisel Kaynak Teorisi’nin ayna görüntü metodu kullanılarak elde edilmiştir. Bu metodun kullanılması için gerekli toprak direncinin hesabındaysa tüm boruların birbirine olan ısı etkileşimi göz önüne alınmıştır.

Savaş [62], Dumlupınar Üniversitesinde “Toprak Kaynaklı Isı Pompası ile Konut Isıtılması” başlıklı çalışmasında, tek katlı ve toprak ısı değiştiricilerinin yerleştirilmesine uygun, yeterli toprak alanı bulunan binaya döşemeden ısıtma metodunu uygulamıştır. Bu çalışmada hem yatay hem de düşey TID için dizayn yapılmış ve bu iki durumun birbirlerine göre avantajları incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada yakıt maliyeti analizi üzerinde de çalışılmış ve Türkiye’deki yüksek elektrik fiyatları nedeniyle bu çalışmanın olumsuz yönde etkilendiği kanısına varılmıştır.

Kara, Erzurum Atatürk Üniversitesinde “Düşük Sıcaklıktaki Jeotermal Kaynakların Isı Pompası Yardımıyla Konut Isıtmada Kullanılması”, başlıklı Doktora çalışmasında, Su-Su kaynaklı Jeotermal ısı pompasını incelemiştir. Yapılan deneylerde kütleli debisi 1.1 l/h, jeotermal suyun giriş çıkış sıcaklığı 35/30 °C iken, gerçek COP değeri 2.8 olarak hesaplanmıştır [63].

Hancıoğlu [59], Ege Üniversitesinde, “Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı Isı Pompası ile Bir Hacmin Isıtılması” başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, düşey TID’li sistemin Üniversite bazında ilk defa bu çalışmada gerçekleştirildiğini belirtmiştir. Güneş Enerjisi Enstitüsünde bulunan bir dersliğin (65 m², 4.3 kW soğutma yüküne sahip) soğutulması ve ısıtılması amaçlanmıştır. Bu çalışma, teorik ve deneysel olmak üzere, iki kısımda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, soğutma etki katsayısı, ısı pompası için 3.3, ısı pompası sistemi için 2.11 olarak bulunmuştur.

Ersöz [60], Ege Üniversitesinde “Toprak Kaynaklı Isı Pompası İle Bir Hacmin Soğutulması” başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü binası içerisinde bulunan bir dersliği, TKIP sistemi ile soğutmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, yerel hava ve toprak sıcaklıkları, toprak özellikleri ve yatırım maliyetleri göz önünde tutularak ısı pompası ve TID tasarımı yapılmış, elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılıp değerlendirilmiştir. Sistemin verimliliği, kızgın buhar soğutuculu ve kızgın buhar soğutucusuz olarak incelenmiş; kızgın buhar soğutuculu ile yaklaşık 3.1, kızgın buhar soğutucusuz ile yaklaşık 2.1 olarak tespit edilmiştir.

Diz [64], Yıldız Teknik Üniversitesinde “Minimum Enerjili Bina Tasarımı (Toprak enerjisiyle)” başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, sabit yüzey sıcaklığını esas alarak topraktaki ısı transferini incelemiş ve optimum boru çapı, akış hızı ve gömme derinliğini tespit etmeye çalışmıştır. TKIP, hem soğutma hem de ısıtma amaçlı olarak dizayn edilmiştir. Sistemin yatırım ve işletme maliyetleri incelenmiş, diğer bazı sistemlerle işletme giderleri ve enerji tüketimi göz önüne alınarak karşılaştırılmış ve sistemin ekonomik olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Kıncay ve Demir [65], İstanbul Hadımköy’de bir villanın ısı kaybı ve ısı kazancı değerlerini bularak dikey tip TKIP sistemi ile hem ısıtma hem de soğutma için boyutlandırma hesaplamaları yapmışlardır.

İnallı ve Esen [66], farklı yatay TID derinliğinde (1 ve 2 m), su-antifiriz karışımının debisinin TKIP sisteminin performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yatay TID’lı TKIP sistemi bir test odasını ısıtma amacıyla kurulmuştur. Test odası (16.24 m² taban alanlı), Elazığ (enlem 38.41° K, boylam 39.14° D) Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesindedir. Odanın ısıtma yükü 2.55 kW olarak hesaplanmıştır. Isıtma sistemi 2002 yılı Ekim ayında kurulmuş ve uzun süreli performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmadaki deneysel sonuçlar, 2002-2003 ısıtma sezonunun Kasım-Mart ayları arasında elde edilmiştir. Sistemin aylık ortalama performans (COP_{sis}) değeri sırasıyla TID (1) ve TID (2) için 2.68 ve 2.82 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra aynı sistem üzerinde soğutma modu için deneyler yapılmıştır. Soğutma modunda söz konusu TKIP sisteminin mevsimlik soğutma performans katsayısı incelenmiştir [67].

Ozgener vd. [68], İzmir’deki Ege Üniversitesinin Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulan düşey U-borulu TKIP sisteminin ekserji ve ekonomi analizini yapmışlardır. Bu amaçla sistemdeki tersinmezlikler bulunmuştur.

Esen vd. [69], yatay TID’lı TKIP sisteminin ısıtma periyodunda termoekonomik değerlendirilmesini yapmışlardır. Bu analiz, çeşitli yakıt türleri veya sistemleri için yapılmıştır ve sonuç’ta Türkiye için Doğalgaz’dan sonra TKIP sisteminin işletme maliyeti bakımından en uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca 2007 yılında, bu sistem ile ilgili olarak üzerinde deneysel çalışmanın yanında sayısal çalışma da yapılmıştır. Bu çalışmada, yatay TID’lı bölgede toprak sıcaklık dağılımı sonlu farklar yöntemi ile belirlenmiştir [70].

Esen vd. [71], soğutma sezonunda deneysel olarak HKIP sistemini yatay TKIP sistemi ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada, TKIP sisteminin HKIP sistemine göre daha iyi performansa sahip olduğu bulunmuştur.

Esen vd. [72], Elazığ’da kurulmuş olan TKIP sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Analiz’de TKIP sisteminin 2 m derinliğindeki TID ünitesinin performansının 1 m derinliğindeki TID ünitesinin performansından enerjitik ve ekserjitik olarak daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Esen vd., [73-77] daha önce bahsedilen TKIP sistemi üzerinde yapay zeka tekniklerini kullanarak TKIP sisteminin performansının tahminini yapmışlardır.

Özyurt vd. [78], Erzurum Atatürk Üniversitesinde, mevcut ısıtma sistemlerine alternatif olabilecek bir TKIP sistemi tasarlamış ve kurmuşlardır. Deney düzeneği, U-borulu dikey TID’li

ve sıvı-sıvı prensibine göre çalışan buhar sıkıştırırmalı bir ısı pompasıdır. Isıtma ünitesi, su sirkülasyon pompaları, yardımcı ve ölçüm elemanlarından meydana gelmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen değerler ile sistemin performans katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca aynı sisteme güneş enerjisi ünitesi de ilave edilerek soğuk iklim bölgesinde güneş ve TKIP sisteminin deneysel incelenmesi yapılmıştır. Isı pompasının buharlaştırıcısı, gündüzleri güneş, geceleri toprak olmak üzere iki ayrı kaynaktan beslenmiştir [79].

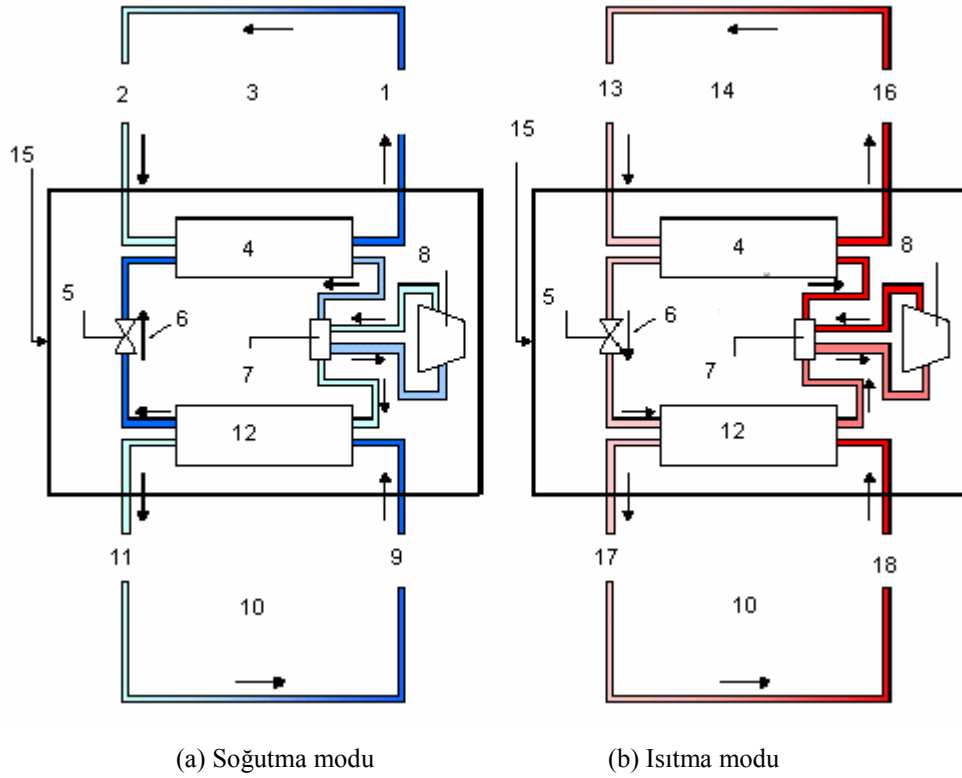
Ünlü vd. [80], Bursa Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu İklimlendirme Soğutma laboratuvarında kurulan bir TKIP sistemi ile 2.25 m X 3 m X 2.7 m boyutlarındaki test odasını ısıtmışlardır. İncelenen sistem, TID ünitesi ve mekanik buhar sıkıştırırmalı ünitelerden oluşmaktadır. TID ünitesi, 3 X 2.5 m² boyutlarında açılan 2 m derinlikteki bir çukur içerisine, 20 m uzunluğunda, 0.016 m çapında, 30 cm aralıklarla yatay olarak döşenmiş polietilen borulardan oluşmuştur.

Yapılan bu tez çalışmasında, Elazığ'da ısıtılacak ve soğutulacak bir köy evinin bahçesinde üç farklı derinlikte (30, 60 ve 90 m) sondaj açılmıştır. Bu amaçla ilk olarak, toprak ısı değiştiricisinin bulunduğu jeolojik yapının ısı iletkenliği ve ısı direnci tespit edilmiştir. Düşey tip tekli U-borulu toprak ısı değiştiricileri konutta bulunan ve ulusal imkânlarla imal edilen bir TKIP ünitesine bağlanmıştır. Sondaj derinliğinin ısı sistem performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Soğutma modundan ısıtma moduna geçişte sistem üzerinde bir takım değişiklikler yapıldığı için sistemin soğutma ve ısıtma performansları mevsimlere göre kıyaslanmamıştır, sadece derinliğin etkisi yaz ve kış şartlarında incelenmiştir. Ayrıca, kurulan TKIP sisteminin ekserji verimleri, sondaj derinliğinin fonksiyonu olarak hem soğutma hem de ısıtma sezonu için belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, U-şekilli ısı değiştiricisi borusunu çevreleyen ve ısı iletken bentonit dolgunun ısı davranışı modellenmiştir. Bu maksatla, U-borulu toprak ısı değiştiricisi ile bağlantılı boru-dolgu oluşumundaki ısı transferini hesaplamak için sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Tezin son kısmında, kurulan TKIP sisteminin modellenmesi için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağları (UBSA) yöntemleri kullanılmış ve karşılaştırılması yapılmıştır.

2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ ESASLAR

TKIP sistemleri (jeotermal ısı pompası sistemleri, yer enerji sistemleri ve yer ısı değiştiricisi sistemleri olarak da adlandırılabilirler) konut ve ticari tip iklimlendirme uygulamaları için alternatif enerji sistemleri olarak son on yılda ilgi çekmiştir. TKIP uygulamaları, ASHRAE tarafından jeotermal enerji kaynaklarının üç kategorisinden biri olarak tanımlanmıştır. Bu kategoriler: (1) yüksek sıcaklık ($>150^{\circ}\text{C}$) elektrik gücü üretimi, (2) orta – düşük sıcaklık ($<150^{\circ}\text{C}$) direkt kullanımlar, (3) TKIP uygulamaları (genellikle $<32^{\circ}\text{C}$) [81].

“Toprak kaynaklı ısı pompası” terimi, ısı kaynağı veya kuyusu olarak toprağı, yer suyunu veya yüzey sularının tümünü içine alan bir ısı pompası terimi olarak tarif edilebilir. TKIP Şekil 2.1’de görüldüğü gibi üç çevrimden (loop) oluşur.



Şekil 2.1. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin çevrim şematiği

Birinci çevrim, hava/su çevrimi veya su/su çevrimi uygulamalarının olduğu yapı yüklerinin olduğu çevrimdir. İkinci çevrim, ısı pompasının olduğu soğutma çevrimidir. Termodinamik açıdan, ısı pompası çevrimi ile buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi arasında fark yoktur, her iki sistem de ısıyı düşük sıcaklıktaki ortamdan çekerek yüksek sıcaklıktaki ortama atar. Soğutma uygulamaları sadece buharlaştırıcıda üretilen düşük sıcaklık etkileri ile ilgilenir,

ısı pompaları ise buharlaştırıcıda üretilen soğutma etkilerinin yanı sıra yoğuşturucuda üretilen ısıtma etkileri ile ilgilenir. TKIP sistemlerinde, ısıtma ve soğutma modları arasındaki dönüşüm, soğutucu akışkanın yönünü değiştiren ters dönüşümlü vana kullanılarak yapılmaktadır. Üçüncü çevrim, toprağın ısını verdiğini veya aldığı su veya antifiriz çözeltisinin dolaştığı toprak ısı değiştiricisi çevrimidir. Şekil 2.1'deki numaralar aşağıda açıklanmıştır.

1. Soğutma yükünü karşılamak için giriş kısmı
2. Soğutma yükünü karşıladıktan sonra dönüş kısmı
3. Konut soğutma yükünü karşılama çevrimi
4. Su soğutmalı veya hava soğutmalı ısı değiştiricisi
5. Genleşme valfi
6. Çevrim yönü
7. Ters dönüşüm vanası
8. Kompresör
9. Toprak ısı değiştiricisinden su soğutmalı ısı değiştiricisine gelen salamura akışkanı
10. Toprak kaynaklı ısı değiştiricisi çevrimi
11. Su soğutmalı ısı değiştiricisinden toprak ısı değiştiricisine giden salamura akışkanı
12. Su soğutmalı ısı değiştiricisi
13. Isıtma yükünü karşıladıktan sonra dönüş kısmı
14. Konut ısıtma yükünü karşılama çevrimi
15. Isı pompası
16. Isıtma yükünü karşılamak için giriş kısmı
17. Su soğutmalı ısı değiştiricisinden toprak ısı değiştiricisine giden salamura akışkanı
18. Toprak ısı değiştiricisinden su soğutmalı ısı değiştiricisine gelen salamura akışkanı

Isı kaynağı/kuyusu olarak toprağın sıcaklığının değişimi havaya göre nispeten daha kararlı olduğu için TKIP sistemlerinin performans katsayısı (COP), geleneksel HKIP sistemlerinden daha yüksektir. Örneğin, normal jeotermal sıcaklık gradyendi yaklaşık 30 °C/km [82] olup, yaklaşık 6.1- 45.7 m arasındaki tabakada toprak sıcaklığı neredeyse sabittir [83]. Toprak içerisindeki sıcaklığın sabit olmasının nedeni, alt (toprağın içi) ve üst (güneş ve atmosfer) kısmında ısı akısının kompleks etkileşiminin bir sonucudur. Sonuç olarak toprağın

içerisindeki sıcaklık yaklaşık olarak ortalama yıllık hava sıcaklığına eşit olur [83]. Yaklaşık 6.1 m derinliğinden daha az bir tabakada toprak sıcaklığı, toprak yüzeyindeki hava sıcaklığının değerine düşer. Bu tabakanın altında yani yaklaşık 45.7 m’ den daha büyük derinliklerde toprak sıcaklığı, doğal jeotermal gradyentine göre yükselmeye başlar [84].

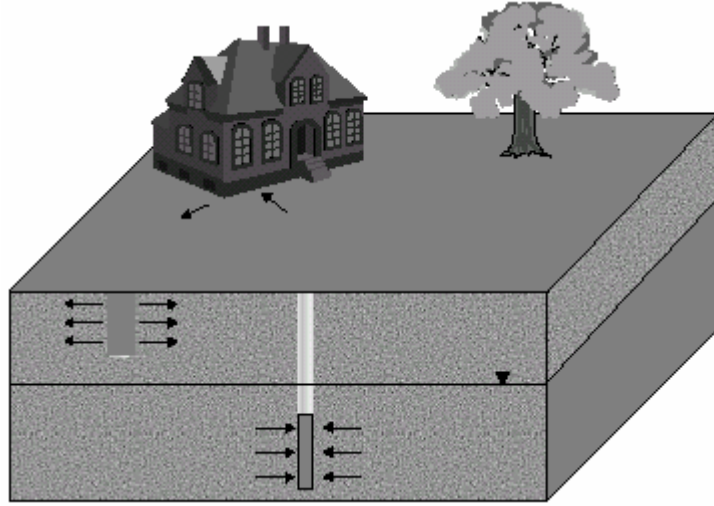
ASHRAE, TKIP sistemlerini ısı kaynağı/kuyusunu temel alarak üç kategoride incelemiştir. Bir dördüncü kategori de üçünün eksikliklerini gidermek için eklenmiştir. Bu kategoriler: (1) yer altı sulu ısı pompası (YASIP) sistemleri, (2) toprak bağlantılı ısı pompası (TBIP) sistemleri, (3) yüzey sulu ısı pompası (YSIP) sistemleri ve (4) sabit sütun kuyulu (SSK) sistemleridir. Aşağıdaki bölümlerde bunların her biri detaylı olarak verilmiştir [81].

2.1. Yeraltı sulu ısı pompası sistemleri (YASIP)

YASIP sistemleri, açık çevrimli sistemler olarak da bilinen TKIP sisteminin orijinal bir tipidir. İlk olarak YASIP sistemleri 1940’ larda kurulmuştur [85].

YASIP sisteminin bir şematiği Şekil 2.2’ de verilmiştir. YASIP sistemlerinde yer altındaki su, geleneksel su kuyuları ve kuyu pompalarından alınarak istenilen yerlere iletilir. Eğer yeraltı suyunun kimyasal kalitesi uygun değilse ısı pompasının korozyondan korunması gerekir. Kullanılan yer altı suyu, akifer ile Şekil 2.2’de gösterildiği gibi toprağın doymamış tabakalarına, yüzey sularına, veya lağımlara tipik bir şekilde boşaltılır. YASIP’ lar için son on yılda en iyi bilinen tasarım teknikleri, kuyu–delgi teknolojileri ve kuyu–test metotlarıdır. Tasarım teknikleri şunları kapsar: toprak–su kullanılabilirliği, toprak–su kimyasal kalitesi ve toprak–su disposal (elden çıkarma) metodudur [84].

YASIP’ ların ana avantajları, diğer TKIP ve geleneksel sistemlere göre düşük maliyet, basitlik ve daha küçük miktarlarda toprak alanına gereksinim duymalarıdır. Dezavantajları ise, sınırlı kullanılabilirliği ve bazı bölgelerde toprak suyunun uygun olmayan kimyasal kalitesidir. Son yıllarda bazı yerlerde topraktan suyun çekilmesinin ve tekrar toprağa atılmasının kullanımı yaygınlaşmıştır.



Şekil 2.2. Yer altı sulu ısı pompası sisteminin şematığı [84]

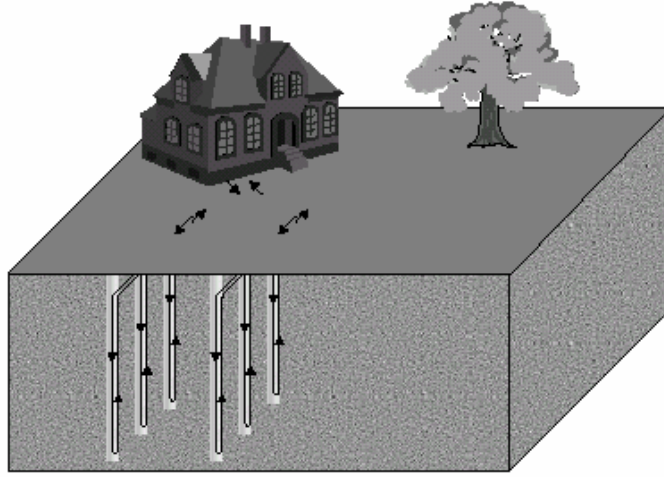
2.2. Toprak bağlantılı ısı pompası (TBIP) sistemleri

TBIP sistemleri, ilk kez 1970’li yıllarda ortaya çıkan ve kapalı çevrimli TKIP sistemleri olarak da adlandırılan sistemlerdir. Sulu sistemlere göre esas avantajları; yer altı suyunun kalitesi ve uygulanabilirliği ile ilgili problemlerin giderilmiş olması ve bu sistemlerde genelde sulu sistemlere göre daha az pompalama enerjisi gerekmesidir. TBIP sistemleri herhangi bir yerde düşey veya yatay olarak kurulabilir.

TBIP sistemlerinde, ısının atılması/çekilmesi toprak içerisindeki boruların içinden geçen akışkanın sirkülasyonu ile sağlanır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’ de gösterilen düşey veya yatay olarak kurulan yüksek yoğunluklu polietilen borular içinde dolaşan akışkan, saf su veya antifriz çözeltisidir. Bu sistemleri düşey TBIP sistemleri veya yatay TBIP sistemleri olarak ikiye ayırabiliriz.

2.2.1. Düşey toprak bağlantılı ısı pompası sistemleri

Düşey TBIP sistemleri, TID konfigürasyonları tipik olarak birden ona kadar sondaj deliğinden oluşan, her bir sondaj deliğinin de U-harfî şeklinde olduğu bir geometride, içerisinden akışkanın sirkülasyonunun yapıldığı sistemlerdir. İsveç’ deki bazı uygulamalarda sondaj kuyuları düşeyde eğimlidir. Tipik U tipi ısı değiştiricisinin çapı $\frac{3}{4}$ ” (19 mm) ile $1\frac{1}{2}$ ” (38 mm) arasındadır. Sondaj deliğinin derinliği ise 30.5 m ile 91.4 m arasındadır. Yer altı sularının sirkülasyon borularına vereceği zararları önlemek için genellikle boruların etrafına halka biçiminde dolgu malzemeleri konur. Ayrıca bu dolgu malzemeleri toprak ile borular arasındaki ısı transferini arttırmak için de kullanılır.



Şekil 2.3. Düşey tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin şematiği [84]

Düşey TID' in tasarımı, bölgenin jeolojik şeklinin ve özelliklerinin ısı performansına etkisine bağlıdır [81]. Her projede toprağın alt yüzey karakteristiğinin tespiti ekonomik olarak mümkün değildir. TBIP sistemlerinin doğru tasarımının yapılmasında temel amaçlardan biri, toprak bağlantılı ısı değiştiricisi uzunluğunun (sondaj deliğinin uzunluğu) hesabının doğru yapılmasıdır [84].

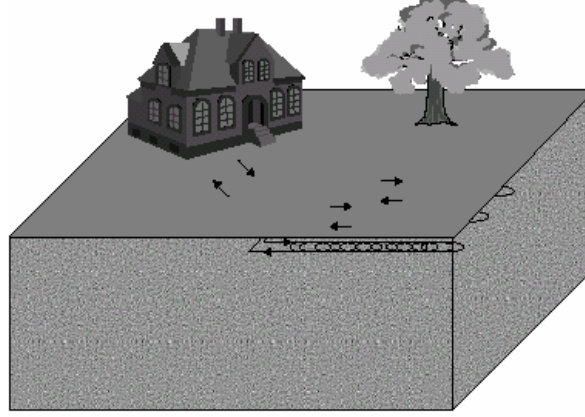
TBIP teknolojisinin ilk zamanlarında, TID boyutlandırılması baş parmak kuralı (ısıtma veya soğutma kapasitesinin tonuna başına, boru uzunluğunun 76.25 m olduğu esası) kullanılarak yapılmıyordu. Bu kural zaman zaman önceki yapılan tasarım tecrübelerinden de faydalanarak toprağın ısı iletkenliğinin tahmininde kullanıldı, fakat daha karmaşık tasarımlarda yeterli görülmedi. Nispeten daha küçük uygulamalarda, başarı sağlanmış bir kuraldır [81].

2.2.2. Yatay toprak bağlantılı ısı pompası sistemleri

Yatay TBIP sistemleri, yaklaşık 0.91 m - 1.83 m derinliğinde hendekler içerisinde yatay TID konfigürasyonlarının seri veya paralel olarak döşenmesi sonucu oluşan sistemlerdir. Şekil 2.4'de gösterilen Slinky (spiral) konfigürasyonları, hendekler ve yüzeysel (fazla derin olmayan) çukurlar içerisinde kurulmuş oldukça yaygın kullanılan konfigürasyonlardır. Daha çok ¾" (19 mm) ile 1½" (38 mm) arasındaki boru çapları kullanılmaktadır. Isıtma ve soğutma kapasitelerinin tonuna başına TID' in yaklaşık uzunlukları 121.9 m ile 182.9 m arasındadır [84].

Yatay TBIP sistemlerinin ısı karakteristikleri düşey sistemlere benzerdir. Yatay TBIP' in ana farkı, bu sistemin yüzeye yakın olmasından dolayı havanın ve hava sıcaklık akışının ısı pompası performansını etkilemesidir. Bu, büyük salınımlı sıcaklık akışlarını ve böylece düşük ısı

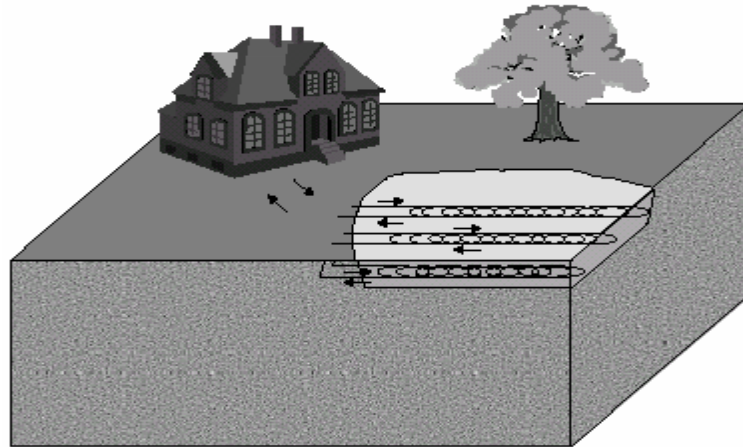
pompası performansını doğurabilir. Ayrıca bu tür sistemlerde daha fazla toprak alanına ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalarda toprağın jeolojik yapısı da önemlidir.



Şekil 2.4. Yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin şematiği [84]

2.3. Yüzey sulu ısı pompası (YSIP) sistemleri

TKIP sistemlerinin üçüncü kategorisi YSIP sistemleridir. YSIP sistemlerinin şematiği Şekil 2.5’ de gösterilmektedir. YSIP sistemlerinin ısı değişiricileri, kapalı çevrimli veya açık çevrimli olabilir. Tipik kapalı çevrimli konfigürasyonları, Slinky kangal halindeki tipi (Şekil 2.5) ve dağınık bir yığın halinde bulunan kangal şeklindeki ısı değişiricisi tipidir. Kapalı çevrimli sistemlerde, ısı çekilmesi/atılması, göllerden, havuzlardan, kaynaklardan veya başka uygun açık kanallardan boruların içerisinde akışkan geçirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Tipik boru çapları $\frac{3}{4}$ ” (19 mm) ile $1\frac{1}{2}$ ” (38 mm) arasındadır. Boru uzunlukları ise, ASHRAE tarafından iklime bağlı olarak ısıtma ve soğutma kapasitesinin tonu başına 30.48 m ile 91.44 m arasında tavsiye edilmiştir. Açık sistemlerde, su yeterli derinlikte, uygun tasarımlarla çekilir. Suyun, ısı transfer mekanizması ve ısı karakteristikleri, topraktan ve kayadan farklıdır [85, 86].

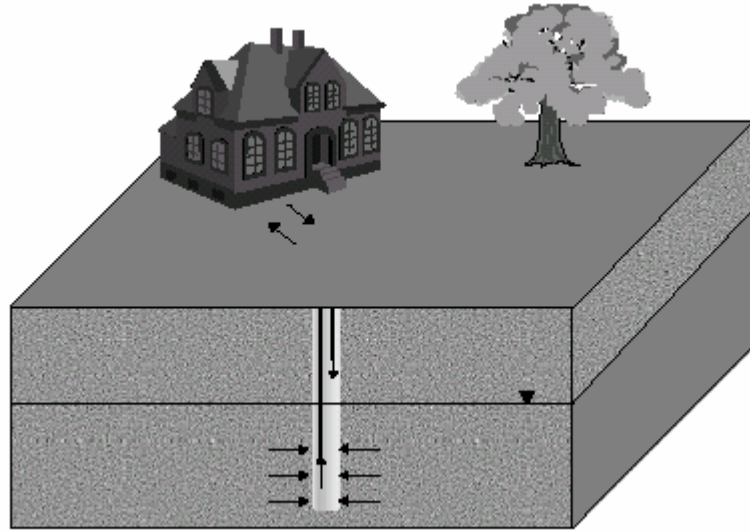


Şekil 2.5. Yüzey sulu ısı pompası sisteminin şematiği [84]

2.4. Sabit sütün kuyulu (SSK) sistemler

TKIP sistemlerinin dördüncü kategorisi, SSK sistemler olarak bilinir. Bu sistemler, YASIP sistemleri kadar eskidir, fakat her geçen gün daha çok ilgi toplamıştır.

SSK' ın şematik resmi şekil 2.6'da gösterilmektedir. TKIP' ın bu tipi, derindeki ısı kapasiteyi sabit, düz şekilde açılmış bir kuyudan eker ve yine aynı kuyudan ısıtılan veya soğutulan ortama doğru atar. Bu sistemler, öncelikle sert kayalı bölgelerde kullanılır. Tipik apı ve derinliēi sırasıyla, 15.24 cm ve 457.2 m' dir. Isı deēiřtiricisinin akışkanı, toprak ile direkt temasta olduēu için kapalı çevrimli ısı deēiřtirgelerine benzememektedir [84].



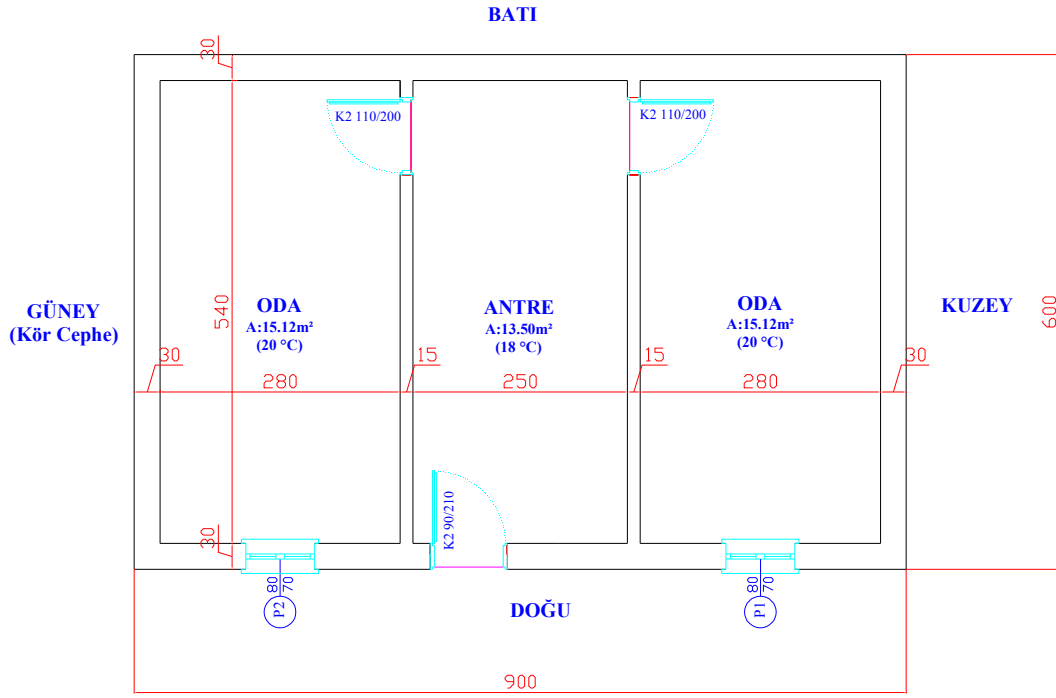
şekil 2.6. Sabit sütün kuyulu sistemin řematiēi [84]

3. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI TASARIMI

3.1. Isı Pompasının Projelendirilmesi

3.1.1. Isı yükü hesabı

Elazığ ili Baskil ilçesi Sultanaşağı köyünde bulunan $(6 \times 9) = 54 \text{ m}^2$ taban alanlı ve 2.3 m yüksekliğindeki Şekil 3.1’de planı verilen üç odalı bir evin güney tarafındaki ısı pompasının bulunduğu odanın toprak kaynaklı ısı pompası yardımı ile ısıtılacağı ve soğutulacağı esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.1. Şartlandırılan odanın bulunduğu konutun planı

Odanın ısı kaybı ve ısı kazancı hesapları, Demirdöküm firması tarafından hazırlanan KTH 2.0 programı ile yapılmıştır [87]. Bu programda yapılan işlem sırası aşağıdaki şekillerle kısaca anlatılmıştır. Programda ilk olarak Şekil 3.2’de gösterildiği gibi proje bilgileri girilmiştir.

Yeni Proje

Genel Tanımlar TS 825 ISI KAYBI ISI KAZANCI

Proje Bilgileri İl & Bölge Tanımları

Proje Adı: Doktora Tezi

Proje Yapanın

Adı Soyadı: Hikmet ESEN

Ünvanı: Arş. Gör.

Sicil No:

Bina Bilgileri

Ada/Parsel:

Binanın tanımı: Köy Evi

Cadde ve bina numarası:

Semt/İlçe/İl: Elazığ

Kullanılacak yakıt türü: Isı Pompası-Elektrik

İleri>>

Şekil 3.2. Proje bilgileri ekran görüntüsü

Daha sonra, ısı yükünün hesabında odanın geometrik özellikleri (duvar, pencere, kapı, tavan ve döşeme vs.) programa yüklenmiş ve Şekil 3.3'deki ekran görüntüsü elde edilmiştir.

Yeni Proje

Genel Tanımlar TS 825 ISI KAYBI ISI KAZANCI

Genel Katsayılar TesisatBilgileri Bina Modeli Kritik Hat Isı Yalıtımı Isıtıcı ve Aksesuarları

Doktora Tezi

Zemin Kat

Oturma odası (salonlar)

DD1

ID1

İK1

DD1

ÇP1

DD15

Tavan

Döşeme

Duvar Tipi

☒ Dış Duvar ☐ İç Duvar ☐ Döşeme/Tavan

İşaret: DD15

Yön: Batı

Uzunluk: 2.8 m

Kalınlık: 30 cm

Yükseklik/Genişlik: 2.3 m

U: 0.76 W/m² K

İç ortam sıcaklığı: 22.0 °C

Dış ortam sıcaklığı: -12.0 °C

<<Geri İleri>>

Şekil 3.3. Oda bileşenlerinin görüntüsü

Ara işlemlerden sonra odanın ısı kaybı hesabı çizelgesi elde edilmiştir. Şekil 3.4’de verilen bu çizelge’den görüleceği üzere odanın ısı kaybı 1720 Watt olarak hesaplanmıştır.



DemirDöküm

Proje Adı

Doktora Tezi

Bayii

Hikmet ESEN

YAPI BİLEŞENİ			ALAN HESABI						ISI KAYBI				ZAMLAR				
İşaret	Yön	Kalınlık	Uzunluk	Yükseklik veya Genişlik	Toplam Alan A _o	Miktar	Çıkarılan Alan	Hesaba Giren Alan A	Toplam Isı Geçiş Katsayısı U	Sıcaklık Farkı Δt	Attırılmaz Isı Kaybı Q _o	Birleşik	Kat Yüksekliği	Yön	Toplam	Toplam Isı İhtiyacı Q_{ih}=Q_i+Q_s	
		cm	m	m	m ²	Ad	m ²	m ²	W/m ² .K	°c	W	%	%	%	1+ %	W	
				0	0	1	0	12.42	0.76	34	320.93						
Diş	G	0.3	5.4	2.3	0	1	0	12.42	0.76	34	320.93						
İç Kapı	K	0	2	1.1	2.2	1	0	2.2	2.9	0	0						
Diş	K	0.15	5.4	2.3	0	1	2.2	10.22	2.16	0	0						
Ahşap	D	0	0.8	0.7	0.56	1	0	0.56	2.55	34	48.55						
Diş	D	0.3	2.8	2.3	0	1	0.56	5.88	0.76	34	151.94						
Diş	B	0.3	2.8	2.3	0	1	0	6.44	0.76	34	166.41						
Diş	K	0.05	0	0	15.12	1	0	15.12	1	22	332.64						
Diş	K	0.06	0	0	15.12	1	0	15.12	2	22	665.28						
											1685.7	7	0	-5	1.02	1720.0	
			Q _s =	1/3.6x(3.0	x9.9	x0.9	x3.52	x34.0	x1.00)							0.0	
																1720.0	

Şekil 3.4. Isı kaybı çizelgesi ekran görüntüsü

Yaz koşullarında bir hacmin iklimlendirilebilmesi için, o hacme çevreden oluşan ısı kazançları ile o hacimde üretilen ısı yüklerinin bilinmesi gerekir. Binaların ısı kazançlarının tayininde dikkate alınan belli başlı yükler; güneş ışıınımı yoluyla cam, duvar, çatı yüzeylerine gelen ısı yükleri, çevre havasından hacme, iletim, taşınım, infiltrasyon ile giren ısı yükleri, mahaldeki insanların, ışık kaynaklarının, çeşitli motor ve cihazların ürettiği ısı yükleri şeklinde sıralanabilir.

Bir binanın ısı kazancı, zamana ve bina içindeki hacmin zonlarına bağlı olarak sürekli değişiklik gösterir. Belli bir hacmin ısı kazancının maksimuma ulaştığı an, binanın ısı depolama kapasitesi, insan yükleri, cihaz yükü tesiri ile hiç umulmadık bir anda oluşabilir.

Şartlandırılan odanın ısı kazancı da Şekil 3.5’de gösterildiği gibi KTH 2.0 programı ile hesaplanmıştır. Bir dizi işlemten sonra Şekil 3.6’da görüldüğü gibi soğutma yükü 1392 Watt olarak hesaplanmıştır.

Yeni Proje

Genel Tanımlar TS 825 ISI KAYBI ISI KAZANCI Camlardan Güneş Işınımı ile Aydınlatma ve Ekipmanlar İnsanlardan

Tasarım Şartları İletim ve Taşınım ile

Çatı Bilgileri

Çatı alanını giriniz : 15.12

Çatı için ısı transfer katsayısını giriniz ($U_c, W/m^2$) 1.209

Çatı tipini seçiniz : 10 cm. hafif beton $U=1.209 W/m^2\cdot^\circ C$

Dış duvarlar için ısı transfer katsayısı ($U_d, W/m^2\cdot^\circ C$) 0.76

Pencere için ısı transfer katsayısı ($U_c, W/m^2\cdot^\circ C$) 2.55

Dış duvarların toplam boyu (L_f, m) 16.4

☒ Mahal içi sıcaklık farkı var

Sıcaklık farkı 2

İç duvarlar için ısı transfer katsayısı ($U, W/m^2\cdot^\circ C$) 2.16

İç duvar alanı (A, m^2) 6.44

Toplam iletim yolu ile ısı kazancı ($Q_d, Watt$) : 257

<< Geri İleri >>

Şekil 3.5. Isı kazancı hesabı ekran görüntüsü

Yeni Proje

Genel Tanımlar TS 825 ISI KAYBI ISI KAZANCI

Tasarım Şartları İletim ve Taşınım ile Camlardan Güneş Işınımı ile Aydınlatma ve Ekipmanlar İnsanlardan

Mahal içinde bulunan insanların aktivite türünü belirleyiniz.

Aktivite türü : Oturarak hafif çalışma

Hacimde kalma süresi (saat) : 2

Hacimdeki insan sayısını giriniz (s) : 1

Hacime girdikten sonra geçen zamanı seçiniz (saat) : 1

İnsanlardan olan ısı kazancı (Q_{insan}, W) : 85

Hava debisi : 50 1/h

Enfiltrasyon ve Havalandırma Yüğü : 575.0 W

Toplam Isı Kazancı Q_K : 1392.0 Watt

Seçilen klima modeli : DDY 18

Seç

<< Geri

Şekil 3.6. Toplam ısı kazancı ekran görüntüsü

3.1.2. Sistem elemanları ve otomasyon

Kurulan ısıt sistemde, 2 HP (1.4 kW)’ lık FH 5524 F tipi tek fazlı hermetik Tecumseh marka bir Freon kompresörü seçilmiştir.

Sistemde kullanılan buharlaştırıcı (kışın buharlaştırıcı, yazın yoğuşturucu), Elazığ Tunç Teknik Soğutma A.Ş. tarafından üretilmiştir. TTE – 3 modelindeki buharlaştırıcı, Freon 22 gazı ile 6000 kcal/h kapasite sağlamaktadır. İç soğutucusu, alüminyum ve boruları bakır malzemeden yapılmıştır.

Friterm firmasının üretmiş olduğu hava soğutmalı yoğuşturucu (kışın yoğuşturucu, yazın buharlaştırıcı) kullanılmaktadır. Yüzey alanı, 10 m² olan HS-10 modeli yoğuşturucunun/buharlaştırıcının kapasitesi, 8 kW’ lık ısı yüküne sahiptir. Yoğuşturucudaki fanın motorunun gücü 160 W’dır.

TID içindeki su-antifriz karışımını ısıtma periyodunda buharlaştırıcıya getirip buharlaştırıcıdan de tekrar TID’ ne gitmesini sağlayan ve ayrıca soğutma periyodunda su-antifriz karışımını yoğuşturucuya getirip yoğuşturucudan tekrar TID’ne yönelmesini sağlayan bir adet Alarko NPVO – 26 – P tipi üç devirli pompa kullanılmıştır.

Kılcal borular, küçük soğutma uygulamalarında termostatik genişleme valfinin yerine kullanılmaktadırlar. Kılcal boruların; kolay anlaşılması, montaj kolaylığı, düşük maliyet, güvenilirlik ve oynak parça olmaması gibi avantajları vardır. Kılcal borular, buharlaştırıcıda/yoğurturucuda belirli gaz akışına izin vermelidirler.

Yoğurturucudaki/buharlaştırıcıdaki soğutucu akışkanın basıncı atmosfer basıncının altına düştüğü zaman, sistem ne kadar iyi izole edilirse edilsin sisteme dışarıdan bir miktar hava sızıntısı olacaktır. Havanın içinde bulunan su buharı, dar kesitlerden geçerken donarak soğutucu akışkanın geçmesini engeller. Bu durum, ısı pompasının performansının düşmesine yol açar. Bunu önlemek için ısı pompasının yoğurturucuyu/buharlaştırıcıyı ile kılcal boru arasına 3/8" lik Carly firmasının üretmiş olduğu DCY 083 tipli bir adet kurutucu konmuştur. Kurutucu içinde bulunan silikajel maddesi soğutucu içindeki su buharını ve diğer yabancı maddeleri soğutucu gazdan ayırmaktadır. Sistem içerisinde dolaşan Freon 22 gazının dryer içindeki durumunu tespit etmek için bir de sistemde kurutucu (dryer) ile kılcal boru arasına gözetleme camı konulmuştur. Carly firmasının üretmiş olduğu 3/8" bağlantı ucuna sahip, rakorlu VCYL 13 tipinde bir adet gözetleme camı kullanılmıştır.

Presostat, kompresörün düşük ve yüksek basınç kısmına otomatik olarak kumanda edebilen bir cihazdır. Isı pompası düzeneğinde presostat, kompresörün girişine ve çıkışına birer ucundan bağlanarak monte edilmiştir. Buharlaştırıcının basıncı, ayarlanan basıncın altına düştüğü zaman, düşük basınç presostatı otomatik olarak kompresörün elektrik motoruna kumanda ederek kompresörü durdurur. Yüksek basınç presostatı da aynı şekilde sistemde meydana gelecek aşırı basınç yükselmesi (ayarlanan basınçtan daha yüksek basınç) durumunda kompresörü otomatik olarak durdurur. Böylece, kompresörün aşırı güç çekerek yanması engellenmiş olur. Yukarıda ifade edilen nedenlerden dolayı ısı pompası deney düzeneğine, emniyetli çalışmayı sağlamak için bir adet Ranco firmasının üretmiş olduğu düşük ve yüksek basınç presostatı konmuştur.

Deney düzeneğine sistemde dolaşan su-antifiriz karışımının debisini ölçmek için sirkülasyon pompasından sonra sisteme monte edilen Teksan firmasının üretmiş olduğu ortalama debisi su için 1.5 m³/h olan su sayacı kullanılmıştır.

Sistemde daha sonra ölçüm alınan noktaların verileceği yerlerde, sıcaklık ölçmek için Cu (Bakır) – Co (Konstantan) ısı çiftleri kullanılarak CR10X datalogger ile belirli zamanlarda değerler kaydedilmiştir. Kurulan sistemde, kompresörün emme ve basma hattına manometreler yerleştirilerek basınçlar ölçülmüştür.

Dijital termostatlı termometre ile ısı pompası sisteminin devreye girip çıkması sağlanarak, oda istenilen sıcaklıkta tutulmuştur. XR20C 32*74 mm ölçülerindeki zamana göre

defrost fonksiyonlu olan cihazın normal sıcaklıklarda soğutma uygulamaları için tasarımı yapılmıştır. Bu sayede, bir dahili zaman sayacı ile kompresör durdurularak defrost işlemi yapılmıştır.

Topraktaki ısının, ısı pompasına veya ısı pompasından toprağa taşınması TID’de dolaştırılan bir akışkan yardımıyla olur. Bu maksatla su, termodinamik ve ekonomik bakımdan oldukça uygun bir akışkandır. Ancak, donma sıcaklığının 0 °C olması bir çok uygulama için en önemli dezavantajdır. Özellikle toprak sıcaklığının düşük olduğu iklim bölgelerinde, donma problemine karşı donma sıcaklıkları daha düşük olan akışkanlar tercih edilmektedir.

3.1.3. Sondaj işlemi ve U-borusunun yerleştirilmesi

Düşey kapalı çevrimli sistemler bugün açık sistemlere nazaran daha yaygın kullanılırlar. Kapalı çevrimli düşey ısı değiştirgeçleri, ev ile toprak arasındaki ısı değişimini sağlarlar. Bu sistemlerde, bir sondaj kuyusu tipik olarak 30 m ile 120 m derinliktedir. Bu sondaj deliğinin çapı, 10 cm ile 15 cm arasındadır. Kuyu kazıldıktan sonra içine yerleştirilen U-borusu genellikle yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden yapılır. U-borusu ile toprak arasındaki ısı temas direncini düşürmek maksadıyla, sondaj deliği içerisine bentonit vb. malzeme dolgusu yerleştirilmektedir [88].

TKIP sisteminde sondaj derinliğinin sistem performansına etkisini incelemek maksadıyla üç farklı sondaj kuyusu kazılmıştır. 30, 60 ve 90 m derinliğindeki ısı değiştirgeçlerinin sondaj kazısının anlatımı ve U-borusunun yerleştirilmesi işlemleri aşağıda detaylı olarak verilmiştir. 30 ile 60 m’lik kuyuların eksenleri arasında 2 m, 60 ile 90 m’lik kuyular arasında 3.4 m’lik mesafe bulunmaktadır.

Sondaj çalışmasına başlamadan önce sondaj alanın fotoğrafı Şekil 3.7’de, kazı makinesinin sondaj çalışmasına başladığı andaki fotoğrafı Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Sondaj çalışmasına başlamadan önceki sondaj alanının fotoğrafı



Şekil 3.8. Kazı aracının fotoğrafı

Kazı çalışmasının başlangıcında sondaj makinesi takozlarla teraziye getirilmiştir. Çakı ucunun rahat dönmesini ve aşınmamasını sağlamak için kazı esnasında su ile devridaim yapılmıştır. Bunun için kazı bölgesine yakın bir yerde Şekil 3.9’da gösterilen çukur açılmış ve buradaki sondaj çalışması süresince bentonitli su kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Devridaim kuyusu

Elazığ Karakaya kil fabrikası tarafından üretilen 50 kg'lık bentonit, dolgu malzemesi olmasının yanısıra kazı esnasında da kullanılmıştır. Kuyunun yıkılmasını önlemek ve kazı çakısının rahat çalışmasını sağlamak için kullanılan bentonitin devridaim suyuna eklendiğinin fotoğrafı Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Bentonitin çalışma suyuna eklenmesi

Trifaze elektrikle çalışan kazı motoru bir kamyonun arka tarafına monte edilmiştir ve istenilen kazı bölgesine rahatlıkla taşınması sağlanmıştır. İçerisinde 8 metrelik sondaj kazı borusu bulunan kule yardımıyla, borular toprak yüzeyi ile dik olacak şekilde temas haline getirilmiştir. İçi boş olan bu borularda soğutma suyu (bentonit + su) dolaştırılmaktadır. Her

sekiz metre kazıdan sonra ilave sondaj boruları kullanılarak istenilen sondaj derinliğine ulaşılmıştır.

30, 60 ve 90 m'lik kuyular, toplam olarak 40 gün süren kazı sonucunda elde edilmiştir. Kazı işlemine 13.11.2005 tarihinde başlanılmış ve iki vardiya halinde günde 10–16 saat sondaj yapılmıştır. Kazı yapılan zemin, kazı süresi boyunca jeologlar tarafından incelenmiş ve zeminin marn olduğuna karar verilmiştir. Marn (sert kaya) yapı nedeniyle kazı çalışmaları beklenenin aksine çok uzun sürmüştür.

Marn, çok ince taneli kil minerallerinden ve kalsitin değişik oranlardaki karışımından oluşan tortul kayaç olup, pekmez toprağı olarak da bilinir. Bu yapı içerisinde değişik oranlarda SiO_2 , kil mineralleri ve demir oksit gibi safsızlıklar bulunduran kireç taşı gibi de düşünülebilir. Hem kalker hem de kil bileşenlerini yan yana içermesi nedeniyle, marn çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Jeolojik açıdan tortul kayalar grubuna giren marn, kalsiyum karbonat ve kilin aynı zamanda sedimantasyonu ile oluşur. Marn kalkere nazaran daha yumuşaktır. Marnlar kalker ve kil bileşenlerinin her ikisini de homojene olmuş bir şekilde ihtiva ettiğinden çimento için çok elverişli hammaddelerdir. Örneğin, kalkersi marnın kimyasal bileşimi portland çimentosunun hammadde karışımına çok yakındır. Marnın yoğunluğu 2.1 g/cm^3 olup fiziksel görüntüsü Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Marn yapısının görüntüsü

Toprak yapısının özelliğinden dolayı, ancak 1.5 metre kazının gerçekleştiği günler olmuştur. 30 metrelik sondajın uzman jeolog tarafından 2 günde bitirileceği tahmin edilmişken, bu işlem toplam 6 gün (13.11–18.11.2005) sürmüştür (Şekil 3.12a ve Şekil 3.12b).



Şekil 3.12. 30 metrelik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri

20.11.2005 tarihinde 60 metrelik sondaj kuyusu için çalışmalara başlanmıştır. 60 m'lik sondaj kazısı toplam 14 günde (20.11–2.12.2005) tamamlanmıştır (Şekil 3.13a ve Şekil 3.13b).



Şekil 3.13. 60 m'lik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri

90 metrelik sondaj kuyusunun açılmasına 10.12.2005 tarihinde başlanılmıştır. Şekil 3.14'de görüldüğü gibi 60 m'lik kuyunun tam 3.4 metre yakınında 90 m'lik kuyu kazılmıştır. 90 m'lik sondaj kazısının süresi ise Şekil 3.14a ve Şekil 3.14b'de verildiği haliyle toplam 20 gün (10.12.2005 – 29.12.2005) sürmüştür. Üç farklı kuyunun toplam kazı süresi 40 gün'dür. Daha nitelikli kazı makineleri ve kazı çakılarıyla bu kazı süresi azaltılabilir.



(a) (b)
Şekil 3.14. 90 m'lik kuyunun a) kazı başlangıç ve b) kazı bitiş durumlarının görüntüleri

Kazı bittikten sonra sondaj içine yerleştirilecek U-borusu, kuyu boylarına göre hazırlanmıştır. U-borusunun malzemesi Polietilen SDR-11'dir. Şekil 3.15'de fotoğrafı verilen kangal halindeki boruların karakteristik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Kangal halinde bulunan boruların görüntüsü

Tablo 3.1. U-borusunun ana karakteristikleri [47]

Özellik	SDR-11
Dış çapı	40 mm
İç çapı	35.2 mm
Yoğunluk	0.96 g/cm ³
Erime sıcaklığı	130 °C
Çalışma sıcaklığı	90 °C
Pik sıcaklığı (anlık)	125 °C
Isıl iletkenlik (λ)	0.4 W/(mK)
Isıl direnç (R_{boru})	0.0815 (K/(W/m))
Lineer genişleme katsayısı	0.17 mm/(mK)
Cidar kalınlığı	2.4 mm

Sondaj kuyularının çapları birbirine eşit olup 150 mm'dir. U-borusunu sondaj kuyusuna salıvermek için 40-50 kg'lık ağırlıklar hazırlanmış ve bu ağırlıklar U-borusunun ucuna bağlanmıştır. Toprak ısı değiştiricisinin U-bağlantısının fotoğrafı Şekil 3.16'da, ucuna bağlanan ağırlığın fotoğrafı ise Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

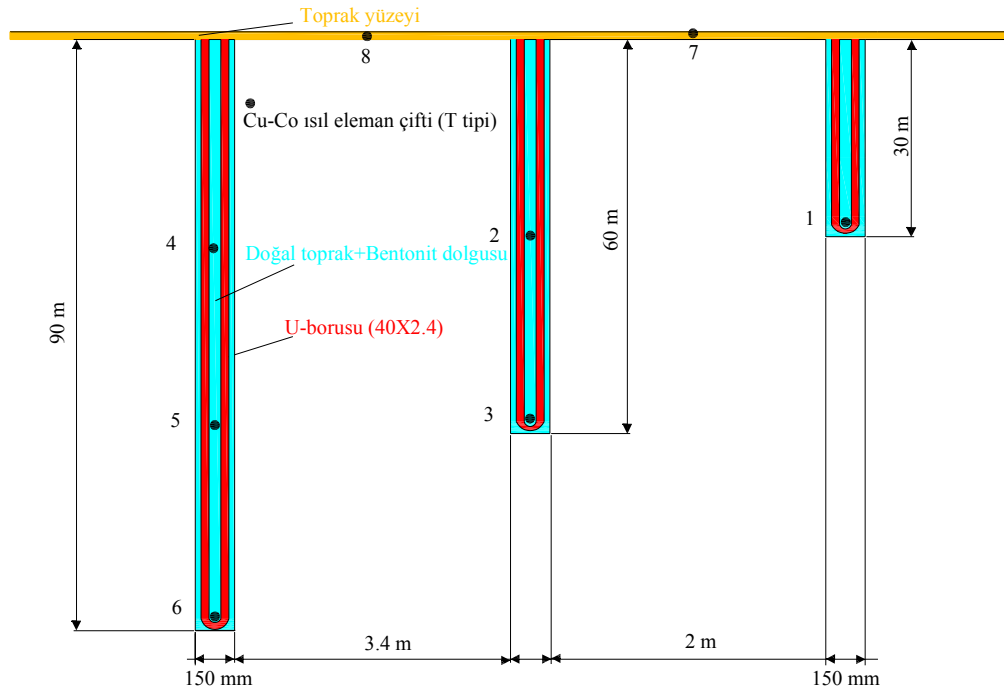


Şekil 3.16. U-borusu görünümü



Şekil 3.17. U-borusuna bağlanan ağırlığın görünümü

30 m'lik kuyu'da bir (1), 60 m'lik kuyu'da iki (2, 3) ve 90 m'lik kuyu'da ise üç (4, 5, 6) farklı derinlikteki noktalarda toprak sıcaklığı ölçümü yapılmıştır (Şekil 3.18). Ayrıca toprak yüzeyinde (7, 8) toprak sıcaklığı ölçülmüştür. Bu sıcaklıkların ölçümünde, T tipi Bakır-Constantan (Cu-Co) ısıl çifti ile uyumlu probler kullanılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.18. Sondaj kısmın şematik görünüşü



Şekil 3.19. Toprağa yerleştirilen ısıtıcı çift probleminin görünümü

Problar, çeşitli noktalara yerleştirildikten sonra U-borusu kuyulara bırakılmıştır (Şekil 3.20). 60 ve 90 m'lik kuyulara U-borularının yerleştirilmesinde zorluklarla karşılaşmıştır. Bunun için birkaç kişiden yardım alınarak boruların istenilen derinliğe indirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.20. Ucuna ağırlık takılan U-borusunun kuyuya bırakılmasının görüntüleri

Üç farklı derinlikteki sondaj kazısında da toprak ile tam teması sağlamak için dolgu malzemesi olarak bentonit kullanılmıştır. Bentonit, su ile karıştırılarak bentonit harcı elde edilmiştir. Bentonitin sondaj deliğinde yıkımın olmaması için kullanımı sonucunda sondaj deliğinin görüntüsü Şekil 3.21’de verilmiştir. Bentonitin dolgu malzemesi olarak kullanımında amaç, hem toprakla borular arasındaki tam teması sağlamak hem de toprağın derinliğinden yukarı doğru suyun kaçması ile ısı kaybını önlemektir. Sondaj kuyularına U-boruları yerleştirildikten sonra bentonit, dolgu makinesi ile kuyulara bırakılmıştır. Kuyulara bırakılan bentonit harcının hazırlanışı ve kuyulara bırakılmasının görüntüsü ise Şekil 3.22’de verilmiştir.

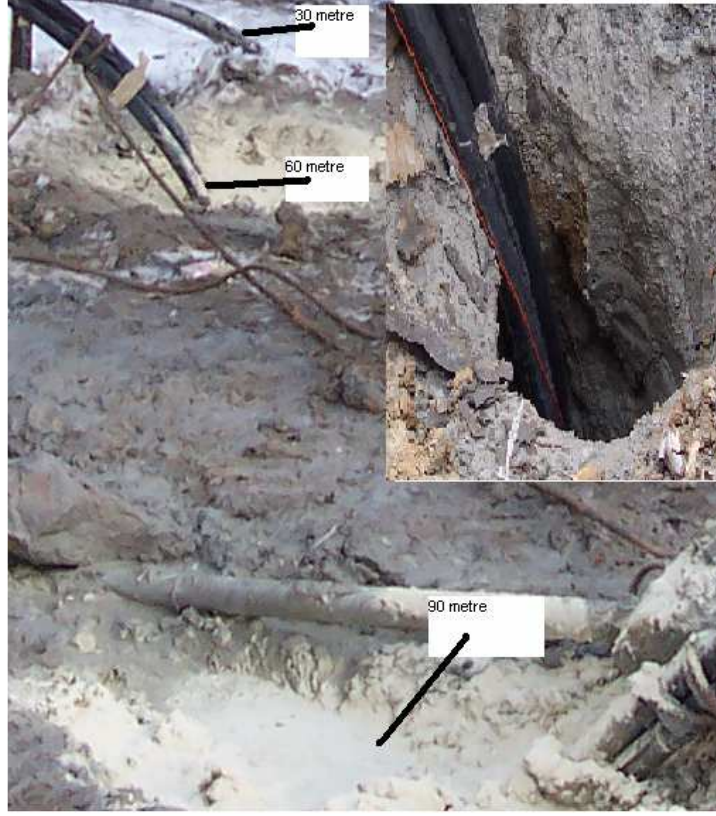


Şekil 3.21. Bentonitin kuyu içerisinde oluşturduğu duvarın görüntüsü



Şekil 3.22. Bentonitin hazırlanışı ve kuyulara doldurulması

Üç farklı kuyunun en son hali ve boruların kuyu içine bırakılması işlemi Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Üç farklı kuyunun görüntüsü ve boruların kuyu içine bırakılması

3.1.4. Isı pompası ünitesinin hazırlanması

TKIP sisteminin tamamlanabilmesi için toprak kısmı (su-antifriz çevrimi) ile ısı pompası tesisatının (soğutucu akışkan çevrimi) birbirine bağlanması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan üç farklı kuyudan (3 geliş + 3 dönüş) toplam 6 adet yalıtımlı boru konut içerisinde vanalar yardımıyla bir gidiş ve bir de dönüş olmak üzere 2 adet boruya düşürülmüştür. Şekil 3.24’de konuttaki dış ortamdan gelen boruların bağlantıları ve üç farklı derinlikteki su-antifriz karışımlarının sirkülasyonunu sağlayan pompaları gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi topraktan dönüş kısmına sirkülasyon pompasından önce su-antifriz sıcaklıklarını ölçmek için probler yerleştirilmiştir.

U-boruları içerisindeki su-antifriz karışımının dolaşımını sağlamak ve su-antifriz karışımının içerisinde havayı önlemek için kullanılan su-antifriz boşaltma kabı Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Ev içi ile toprak kısmının birleşiminin görünümü



Şekil 3.25. Su- antifriz karışımı boşaltma kabının görünümü

Mahal içindeki sistemi oluşturan kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve kılcal boru kısımlarının bağlantıları bakır borularla uygun bir teknikle yapılmıştır. Daha sonra devreye

Freon 22 gazı doldurularak test edilmiştir. Isı pompası sisteminin en son haliyle fotoğrafı, Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.26. Isı pompası sisteminin görünümü

4. ISIL DUYARLILIK TESTİ

Toprak ısı değiştiricili sistemlerin doğru tasarımındaki en önemli aşama, toprağın ısı özelliklerinin belirlenmesidir. Isı duyarlılık testi (IDT), toprak ısı değiştiricisi tasarımı dışında dolgu malzemesinin analizi, ısı değiştirgeci tipi ve yer altı suyu etkileri için de kullanılmaktadır [89]. Test sonuçlarından elde edilen ısı özellikler (Isıl iletkenlik, λ ve Isıl direnç, R_b) kullanılarak bu türden tasarımların ekonomikliği incelenmektedir. Günümüzde yeraltındaki jeolojik yapıların ısı özelliklerinin yerinde belirlenmesinde hareketli IDT cihazından (şekil 4.1) daha uygun bilinen bir metot henüz bulunmamaktadır. IDT'in teorik temeli birkaç on yıl geriye dayanır [6, 90]. 1990'lı yıllarda, ilk uygulama Linköping'deki sondaj deliği ısı deposu için yapılmıştır [91]. Bu gelişmenin ardından İsveç'in Lulea Teknik Üniversitesinde ve ABD'de Oklahoma Üniversitesinde kurulu bulunan 1995-1996 yıllarında birbirleri ile eş zamanlı tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu cihazlar ile 2005 yılına kadar Kanada, şili (deneysel), Çin, Almanya (4 adet), Hollanda, Norveç, Güney Kore, İsveç (çeşitli), İsviçre, İngiltere, Amerika (çeşitli) ve Türkiye gibi ölkelerde deneyler yapılmıştır [51].

Austin [92] TKIP sisteminde ısıtma ve soğutma için kullanılan sondaj deliğindeki kararlı toprak sıcaklığını saptayarak, bu sıcaklığın IDT analizinin doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Nagano vd. [53], yer altı suyu akışının toprak ısı değiştiricisinin performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu alanda yapılan diğer çalışmalar yer altı suyunun ısı geçişini önemli oranda artırdığını göstermektedir [93, 94]. Literatürdeki bazı çalışmalarda, IDT sistemlerinin temel kavramları, teoriği ve tarihsel gelişimi incelenmiştir [6, 95]. Sanner vd. [51], IDT deneyinin temel kavram ve teorilerinin kısa tanımlanmasını yaparak tarihsel gelişimini ve bu teknolojinin dünya üzerindeki deneylerini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada kullanılan IDT cihazı, Türkiye'de Çukurova Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma ve Uygulama Merkezi envanterinde bulunan cihazdır. Bu cihaz, 2000 tarihinde Lulea Teknik Üniversitesi tarafından Çukurova Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma ve Uygulama Merkezine hibe edilmiştir.

4.1. IDT'in Çalışma Prensibi

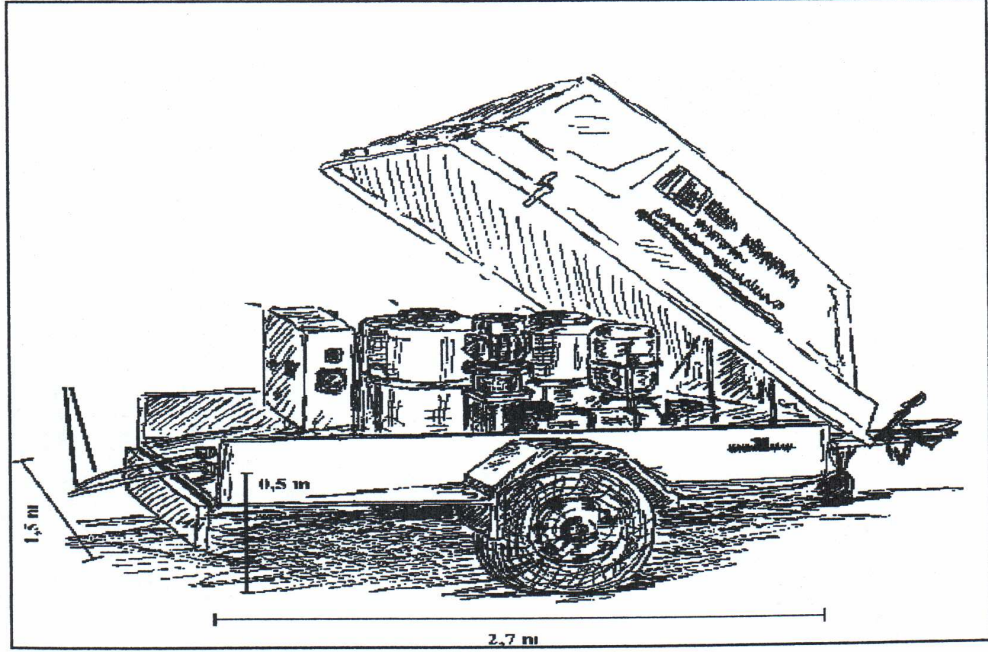
Isı duyarlılık testi'nin amacı, yukarıda da belirtildiği gibi yer altında bulunan jeolojik yapının yerinde ısı dirençlerini (R_b) ve ısı iletkenliklerini (λ) saptamaktır. Cihazın taşınabilir olması nedeniyle araç girebilen her yerde ölçüm alma şansı bulunmaktadır. Üç faz elektrik hattı ile çalışan IDT cihazı, sirkölasyon sıvısı olarak şebeke suyunu kullanır. Bir motorlu araç arkasına bağlanan cihazın ağırlığı yaklaşık 470 kg'dır. Cihazın ölçüleri şekil 4.2'de verilmektedir.

Cihazda bulunan üniteler ise şunlardır;

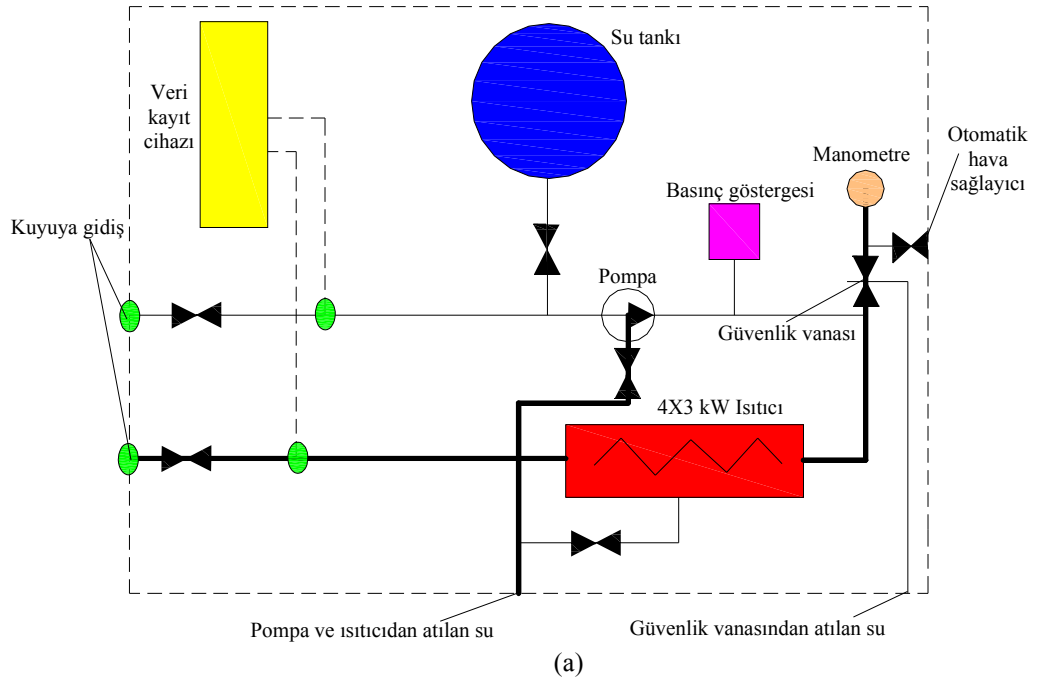
- Su deposu
- Debi ölçer
- Sirkülasyon pompası
- Veri kayıt cihazı
- Isıtıcı (4 X 3 kW)
- Elektrik kontrol panosu
- Otomasyon için gerekli vana, boru ve göstergeler (Şekil 4.3a ve 4.3b).



Şekil 4.1. Isıl duyarlılık testi (IDT) cihazı



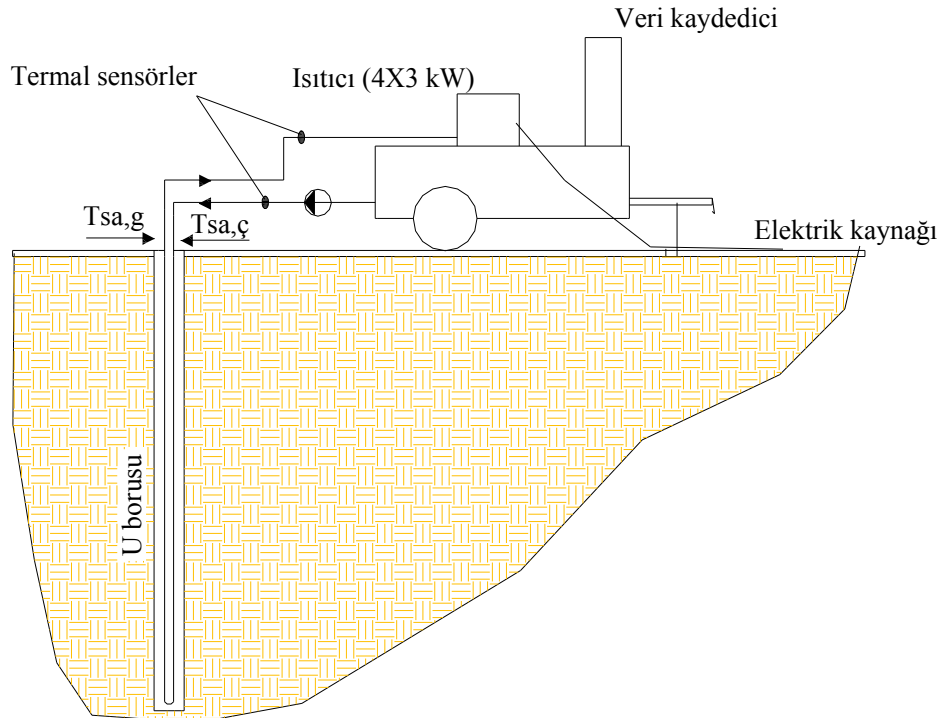
Şekil 4.2. IDT cihazı ve boyutları [90]





(b)

Şekil 4.3. (a) IDT cihazının akış şeması, (b) IDT cihazının kabin iç yapısının görünümü



Şekil 4.4. IDT ünitesinin şematik görünümü

Cihaz, su deposuna doldurulan su ile test alanının içinde açılan ve içine polietilen U-borusu indirilen kuyuya bağlanır. İlk etapta yer altı sıcaklığının ve depodaki suyun ısı dengeye gelmesi için 20-30 dakika (bazen 2 saat) kadar oluşturulan kapalı döngü, sirkülasyon pompası aracılığı ile başlatılır. Sirkülasyon basıncı 2-3 bar civarındadır. Basınç, devamlı olarak cihaz üzerinde bulunan barometre aracılığı ile takip edilir ve deney başladıktan sonra ilk 10 dakika içerisinde sistem içindeki hava alınır.

Daha sonra kuyunun derinliğine göre belirli güçteki ısıtıcılar çalıştırılır. IDT cihazı üzerinde 4 x 3 kW gücünde ısıtıcılar bulunmaktadır. Önerilen, 100 m derinliğindeki kuyular için 3 kW, 150 m derinliğindeki kuyular için 6 kW, 200 m derinliğindeki kuyular için 9 kW ve 200 m'den daha derin olan kuyular için 12 kW'lık güç uygulamasıdır [96]. Isıtıcı çalıştırıldıktan sonra elektrik panosu içindeki sayaçtan güç okuması yapılır ve kayıt edilir. Veri kayıt cihazı sirkülasyon boyunca her 10 dakikada bir suyun kuyuya giriş, çıkış ve dış ortam sıcaklıklarını kaydeder (Şekil 4.4). Bu çalışmada, sistem her bir test için 48 saat çalıştırılmıştır. Deney sonunda diz üstü bir bilgisayar aracılığı ile veri kayıt sistemine bağlanılır ve kaydedilen veriler bilgisayara alınır. Bundan sonraki aşama bilgisayardaki söz konusu verilerin değerlendirilmesidir.

Deney bittikten sonra sistem içindeki su boşaltılır. Elektrik panosunun içindeki sayaçtan yeniden güç okuması yapılır ve vanalar kapatılır. Deney sonundaki güç okumasından, başlangıcındaki güç okuması çıkarılarak kayıt edilir.

Cihaz üzerinde 4 adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi akışkanın kuyuya giriş ve çıkış sıcaklıklarını ($T_{sa,g}$ ve $T_{sa,ç}$), üçüncü sensör dış ortam sıcaklığını ($T_{dış}$) ve dördüncü sensör de veri kayıt cihazı üzerindeki sıcaklığı (T_{ref}) ölçmektedir.

4.2. IDT Ölçümü Verilerinin Değerlendirilmesi

IDT cihazının verilerinin değerlendirilmesi ile ilgili teorik analiz İsveçli araştırmacılar Göran Helleström ve Singhild Gehlin [91] tarafından 1997 yılında ortaya konmuştur. IDT'nin temeli, sisteme verilen ısının, sabit bir güç kaynağından verilmesi prensibine dayanır. IDT cihazı ile alınan ölçümler, yani kanala giriş-çıkış sıcaklık değerlerinin ortalaması (T_f), $\ln(t)$ 'ye karşı çizilir ve buradan elde edilen doğrunun eğimi, k , (4.1) nolu eşitlikle, (4.2) nolu eşitlikte yerine konularak efektif λ değeri hesaplanır. Daha sonra bulunan bu değer (4.3) nolu eşitlikte yerine konularak R_b hesaplanır. Bu işlemi takiben, farklı λ değerleri, deneme yanılma yöntemi ile (4.4) nolu eşitlikte yerine konulur ve bu işlem sonucu çizilen grafiklerden en uygun olanı bize ısı iletkenliği ve ısı direnci verir. Sondaj deliği tipindeki ısı değiştirgeçlerinde bilgi yorumlandığında en çok kullanılan analitik işlem çizgisel kaynak modelidir [97]. Morgensen

1983 yılında IDT verilerini değerlendirmek için çizgisel kaynak metodunu önermiştir. Çizgisel kaynak modeli yardımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilir [96].

$$T_f = k \ln(t) + m \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H} \quad (4.2)$$

$$m = \frac{Q}{H} \left\{ \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] - R_b \right\} + T_{\text{çevre}} \quad (4.3)$$

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left\{ \frac{Q}{H} \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \left\langle \ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right\rangle + R_b \right] + T_{\text{çevre}} \right\} \quad (4.4)$$

burada,

λ = Isıl iletkenlik (W/mK),

Q = Uygulanan ısı gücü (kW),

T_f = Giriş- çıkış ortalama akışkan sıcaklığı (K),

r_b = Kuyu yarıçapı (m),

T_{sur} = Kuyu ilk sıcaklığı (K),

α = Isıl yayılım katsayısı (m²/s),

H = Efektif kuyu derinliği (m),

t = Zaman (s),

R_b = Isıl direnç (K/(W/m)),

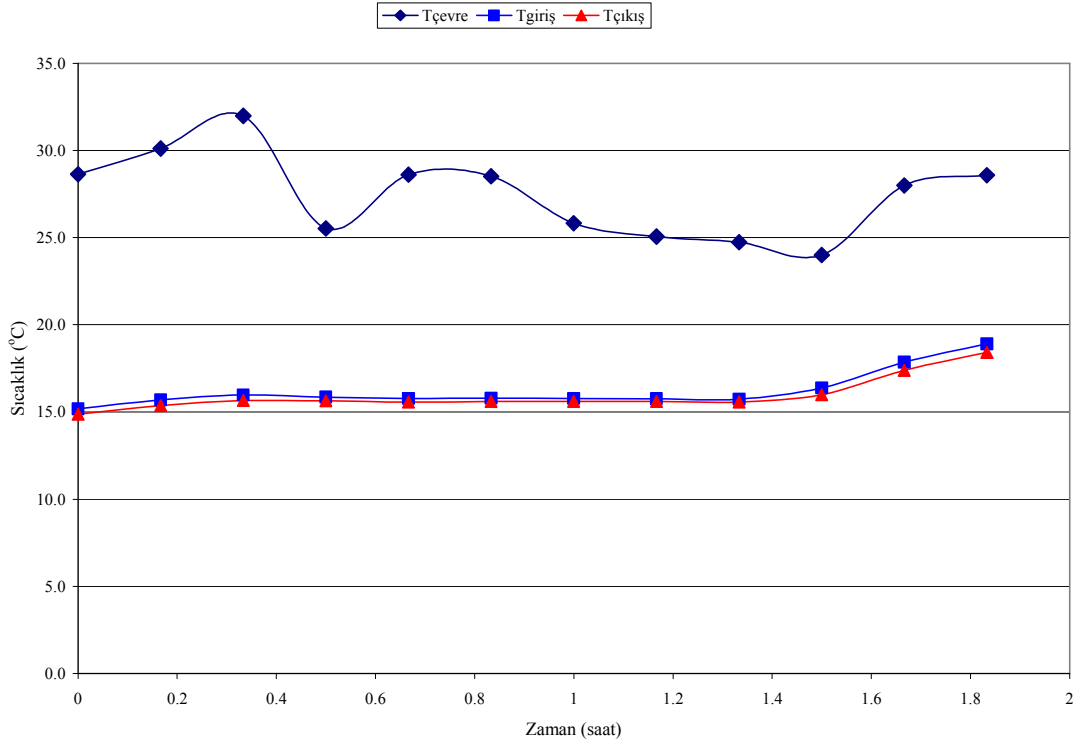
γ = Euler sabiti (0.57).

Grafiklerde bazı yerlerde görülen anormalliklerin (Şekil 4.10) sebebi, deney başlangıcından sonra kontrol amaçlı IDT cihazının kapağının açılmasıdır. Kapağın açılması ile birlikte ortam sıcaklığı düşmüş ve bu da verilere yansımıştır. Her ne kadar bu anormallik deney sonuçlarını büyük ölçüde etkilemese de ölçümlerin hassasiyeti konusunda fikir vermektedir.

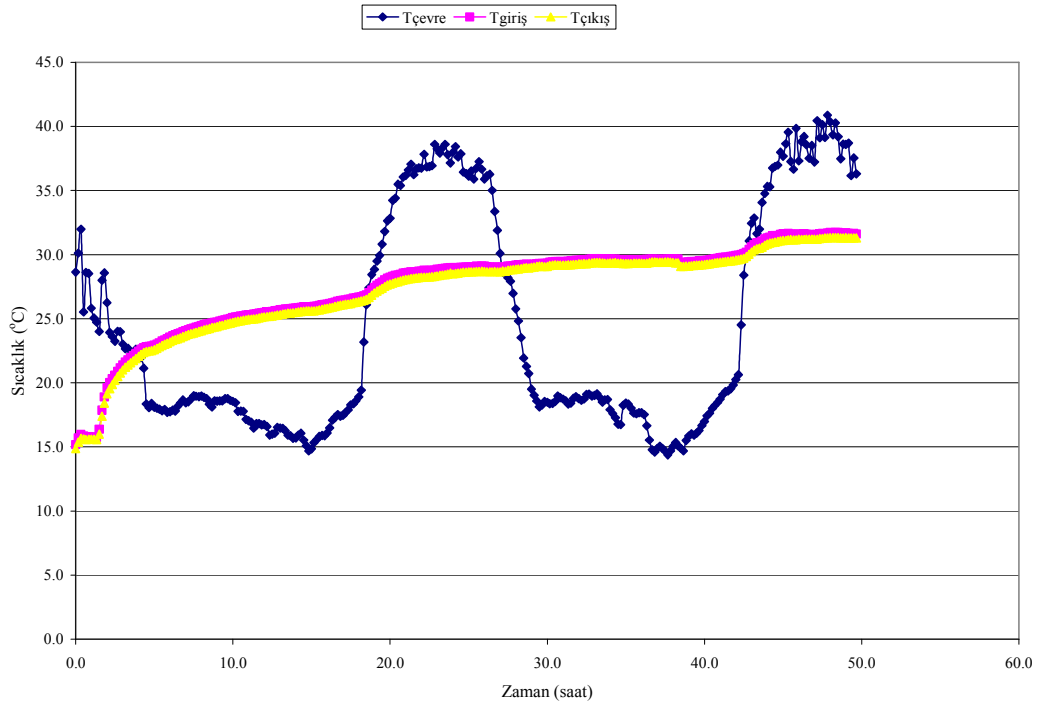
Mevcut çalışmada, TUBİTAK Hızlı Destek Programından 106Y188 nolu proje ile 48 X 2 = 96 saatlik çalışma için IDT cihazı kiralanmıştır.

Cihaz ilk önce, 60 m'lik kuyu için teste hazırlanmıştır. Toplam 48 saat test yapılmıştır. Bu deney sırasında 3 kW'lık bir ısıtıcı kullanılmıştır. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi yaklaşık 2 saat

boyunca sirkülasyon sıvısı ile toprak sıcaklığının ısıl dengeye gelmesi beklenmiş ve 2 saat sonunda 3 kW'lık bir ısıtıcı devreye alınmıştır. Isıtma başladıktan sonraki su-antifriz karışımının sıcaklık değişimleri ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

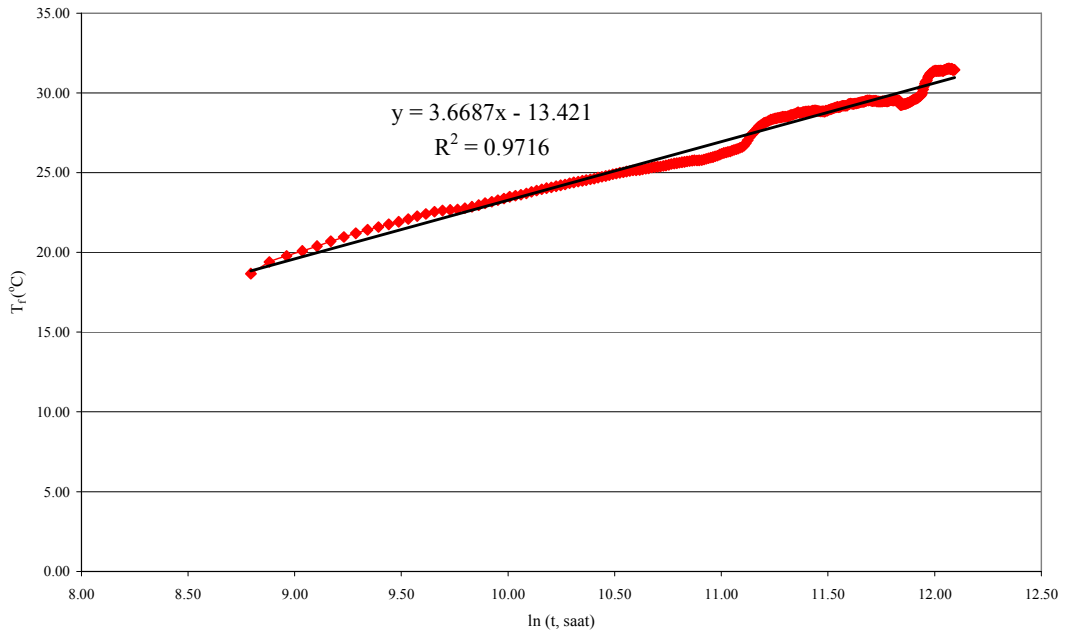


Şekil 4.5. Sirkülasyon sıvısının toprak ile ısı dengeye geldiği zaman aralığındaki sıcaklık değişimi



Şekil 4.6. Test süresince çevre ve su-antifriz sıcaklıklarının değişimi

Toplam 48 saat süren bu işlem sonucunda giren ve çıkan su-antifiriz sıcaklıklarının ortalamasının (T_f) logaritmik zamana [$\ln(t)$] karşı grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. Eğilim çizgisi sayesinde R^2 değeri 0.9716 olarak bulunmuştur. Buradan elde edilen doğrunun eğimi, k , (4.1 nolu eşitlik), (4.2) nolu eşitlikte yerine konularak efektif λ değeri hesaplanmıştır. Daha sonra bulunan bu değer (4.3) nolu eşitlikte yazılarak R_b parametresi elde edilmiştir. 60 m’lik kuyuda yapılan deney sonucunda dolgu bölgesinin ısı iletkenliği (λ) 1.70 W/mK, ısı direnci ise 0.05 K/(W/m) olarak bulunmuştur. Yapılan hata analizinde 60 m’lik kuyunun hata değeri %1.85 olarak hesaplanmıştır. Bu test sonucunda oluşan değerler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.



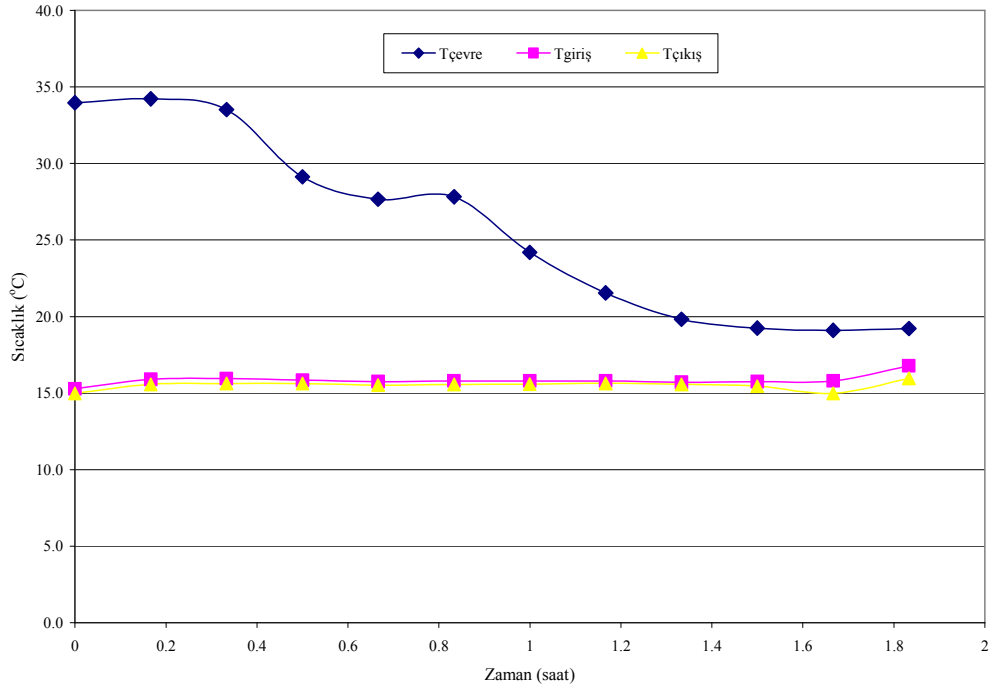
Şekil 4.7. T_f 'nin logaritmik zamana karşı grafiği

Tablo 4.1. 60 m’lik kuyuda IDT sonuçları

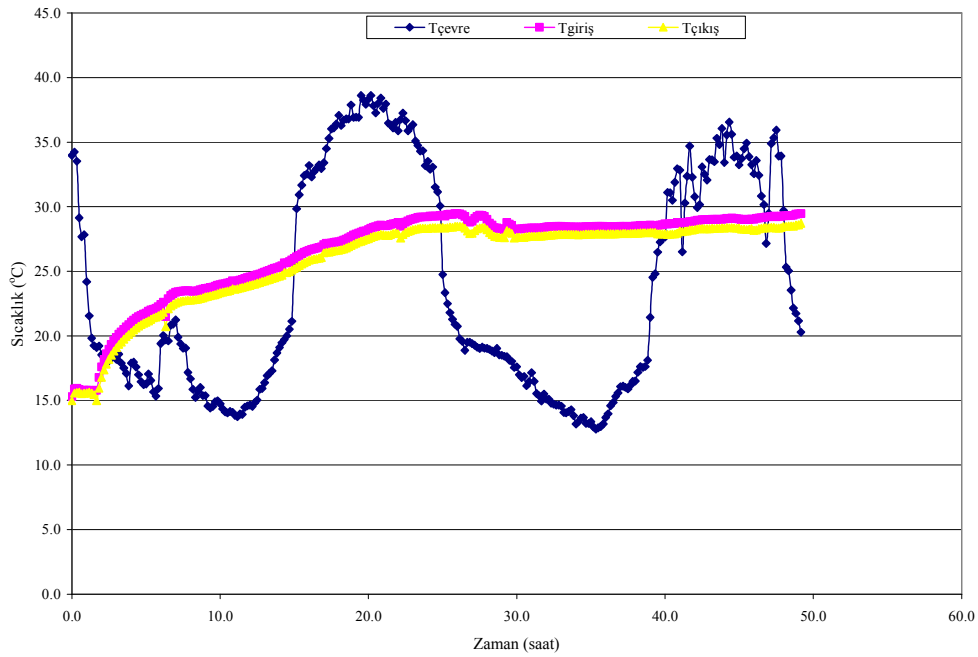
Test süresi	48 saat
Kararlı toprak sıcaklığı	15.7 °C
Atılan ısı	4.90 kW
Sondaj derinliği	60 m
Sondaj deliği çapı	150 mm
Isıtıcı gücü	3 kW
Isı kapasitesi (C_p)	2200000 J/kgK
Isıl yayılım katsayısı (α)	$7.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Daha sonra cihaz, 90 m'lik kuyunun testi için hazırlanmıştır. Bu test, 48 saat sürmüştür. Bu deneyde her biri 3 kW olan 2 adet ısıtıcı devrede kullanılmıştır.

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi yaklaşık 2 saat boyunca sirkülasyon sıvısı ile toprak sıcaklığının ısıl dengeye gelmesi beklenmiş ve 2 saat sonunda 3 kW'lık iki ısıtıcı açılmıştır. Isıtıcı açıldıktan sonraki sıcaklık değişimleri ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

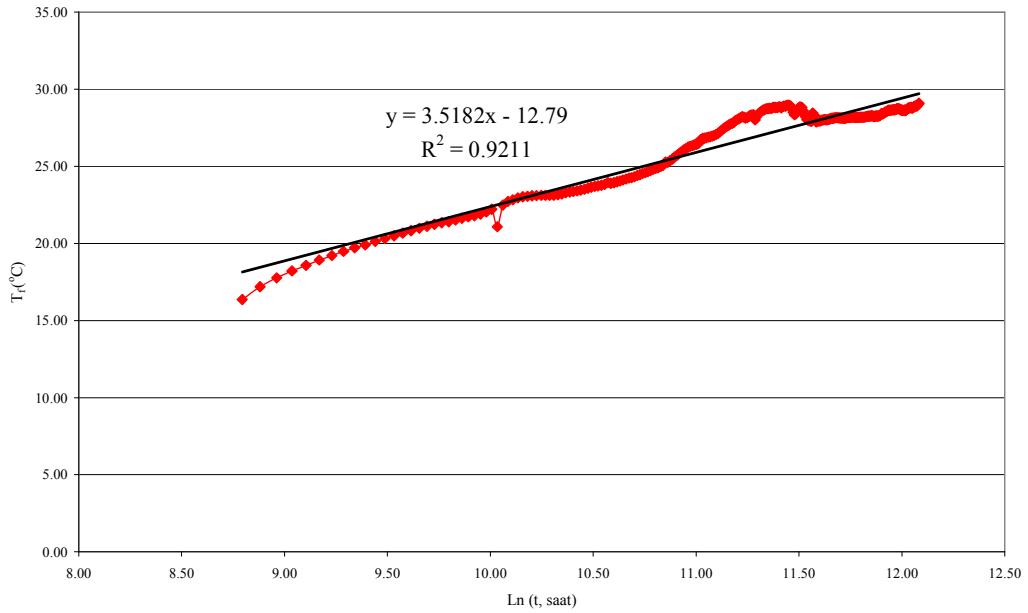


Şekil 4.8. Sirkülasyon sıvısının toprak ile ısı dengeye geldiği zaman aralığındaki sıcaklık değişimi



Şekil 4.9. Test süresince çevre ve su-antifriz sıcaklıklarının değişimi

Toplam 48 saat süren bu işlem sonucunda giren ve çıkan su-antifriz sıcaklıklarının ortalaması (T_f) alınarak, T_f 'nin logaritmik zamana $[\ln(t)]$ karşı grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Eğilim çizgisi sayesinde R^2 değeri 0.9211 olarak bulunmuştur. Buradan elde edilen doğrunun eğimi, k , (4.1 nolu eşitlik), (4.2) nolu eşitlikte yerine konularak, efektif λ değeri hesaplanmıştır. Daha sonra bulunan bu değer (4.3) nolu eşitlikte yazılarak, R_b parametresi elde edilmiştir. 90 m'lik kuyuda yapılan deney sonucunda dolgu bölgesinin ısı iletkenliği (λ) 1.70 W/mK, ısı direnci ise 0.03 K/(W/m) olarak bulunmuştur. Yapılan hata analizinde 90 m'lik kuyu için hata, %2.22 olarak hesaplanmıştır. Bu test sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. T_f 'nin logaritmik zamana karşı grafiği

Tablo 4.2. 90 m'lik sondaj kuyusu IDT sonuçları

Test süresi	48 saat
Toprak sıcaklığı	15.7 °C
Atılan ısı	4.90 kW
Sondaj derinliği	90 m
Sondaj çapı	150 mm
Isıtıcı gücü	6 kW
Isı kapasitesi (C_p)	2200000 J/kgK
Isıl yayılım katsayısı (α)	$7.73 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Isıl iletkenliği artırmak için literatürde birçok çalışma vardır. Ne yazık ki, çoğu doğal toprak yapılarının ısı iletkenliği dolgu malzemelerinin ısı iletkenliği ile kıyaslandığında çok düşük olarak ortaya çıkmıştır. Standart bentonit esaslı dolguların ısı iletkenliği tipik olarak 0.73 W/mK olup en çok kullanılan dolgu malzemesi içinde yer almaktadır [22]. Bu çalışmada da, bentonit dolgunun IDT sonucunda her iki kuyuda da ısı iletkenliği 1.70 W/mK olarak hesaplanmış olup ASHRAE değerinin üzerindedir. Bu değerden daha yüksek çıkan deneyler de vardır. Birkaç istisna dışında, doğal kaya ve toprak formasyonlarının ısı iletkenliği standart bentonit dolgunun ısı iletkenliğinden yüksek çıkmıştır [22]. Böylece, standart bentonit esaslı dolgular ile düşey U-borulu toprak ısı değıştiricisi boyunca oluşan dolgu, ısı kaynağı/kuyusu ile ısı değıştirgeci arasında yalıtım görevi görür. Bu problemi çözmek için, ısı iletkenliği artırıcı dolgular geliştirilmiştir. Çimentoyu andıran karışımlar [98] ve bentonit/kuartz kumlu karışımlar [99] olmak üzere iki adet ısı iletkenliği artırıcı yöntem geliştirilmiştir.

Bentonitin sondaj deliği içindeki ısı transferi üzerindeki olumsuz etkisi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [24]. Yükleme durumunun ısı atma şeklinde olduğu bir durumda, sondaj deliği çapının 16.5 cm olduğu standart bentonit dolgusu yapılmış kuyu ile sondaj deliği çapı 12.1 cm olan ısı iletkenliği artırılmış bentonit dolgusu ile doldurulan kuyular kıyaslandığında küçük çaplı kuyuda ortalama su sıcaklığının yaklaşık 6 °C daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. 16.5 cm'lik sondaj deliği çapına sahip ince kum dolgusu yapılmış bir dolgu ile aynı çaplı standart bentonit dolgusu kıyaslandığında 8 °C'nin üzerinde ortalama su sıcaklığı düşürülmüştür. Sondaj deliği çapı 16.5 cm olan tipik bir sistem için [24], standart bentonit dolgusu kullanımı aynı özellikteki kuyuda ince kumlu dolgulu hale göre gerekli boru uzunluğunu % 49 artıracaktır. Çapı 12.1 cm'den daha düşük bir kuyuda ısı iletkenliği artırılmış dolgu kullanılması durumunda, çapı 16.5 cm'den daha büyük kuyuda ince kumlu dolgu malzemesi kullanılmasına göre boru uzunluğu % 10 artacaktır. Böylece, bu çalışmanın [24] sonucunda dolgu malzemesinin sistem performansı üzerinde etkisi üç adımla azaltılabilir. Birincisi, dolguyu yetecek kadar kullanarak dolgu miktarını azaltmaktır. Kumlar ve kesiciler müsaade edilen yerlerde kullanılmalı fakat delik çapı ile borular arasındaki tüm ara yüzeyler dolduğundan emin olunmalıdır. İkincisi, bir dolgu kullanıldığında, ısı iletkenliği artırılmış dolgular sağlanmalıdır. Sonuçta, herhangi bir dolgu malzemesinin etkisini azaltmak kadar boru çapını azaltmak da mümkündür.

Sonuç olarak, 60 ve 90 m derinliğindeki sondaj kuyuları arasında 3.4 m'lik bir mesafe olup toprak yapısı aynıdır. Toprak yapısı aynı olmasına rağmen toprağın ısı iletkenliği iki kuyu için de aynı çıkmıştır, ancak ısı direnç farklı bulunmuştur. Bu farkın sebebi, yeraltı su hareketinin durumu ve sondaj derinliği'dir. R_b 'nin sondaj derinliği artıkça daha düşük çıkması gerekir, çünkü su toprakta dolaşırken daha fazla zaman harcadığı için zaman fazla olacak,

dolayısıyla zaman da R_b ile ters orantılı olduğundan R_b daha düşük çıkacaktır [96]. Bu sonuç bizim çalışmamız ile de uygundur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Deneylerde Ölçülen Parametreler

Deneylerde, belirli aralıklarla aşağıdaki ölçümler yapılmıştır:

- Sıcaklık,
- Debi,
- Basınç,
- Güç.

5.1.1. Sıcaklık ölçümleri:

Yapılan deneyler süresince sistemin çeşitli noktalarında, soğutucu akışkan, sistemde dolaşan su-antifriz karışımı ve farklı derinliklerdeki toprak sıcaklıkları ölçülmüştür. Ayrıca ısıtılan iç ortam (oda) ve dış ortam sıcaklığı da ölçülmüştür. XR20C cihazı yardımıyla oda içi ortam hava sıcaklığı ayarlanan değere geldiğinde önceden belirlenen sıcaklık aralığına göre, sistem devreye girmekte veya devreden çıkmaktadır. Dış ortam sıcaklığı ise civalı termometre ile ölçülmektedir.

Ayrıca yoğuşturucunun ön ve arka kısmına yerleştirilen ısı çiftleri ile yoğuşturucuya giren ve çıkan havanın sıcaklığı ölçülmektedir. Deneylerde ölçülen sıcaklık değerleri veri kaydedicide (data logger) kaydedilmiştir. Veri kaydedicinin ve sıcaklık değerlerinin aktarıldığı bilgisayarın birlikte görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir. Veri kaydedicinin markası CR10X olup 25 farklı kanallı bir AM25T çok düzeyli birleştirici ile kayıt gerçekleştirilmektedir. Veri kaydedicisinde 12 Volt’luk bir güç kaynağı (akü) kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Data logger’in ve bilgisayarın birlikte görünümü

5.1.2. Debi ölçümleri:

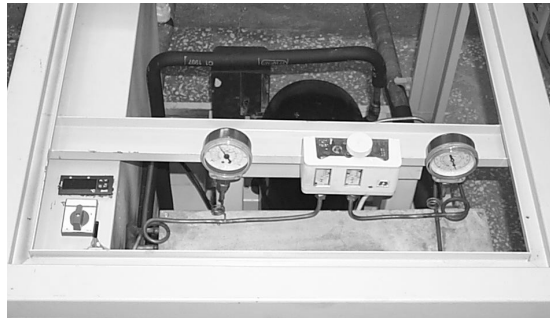
U-borusunun içerisinde dolaşan su-antifiriz karışımının kontrolü vanalı musluk kollektörü ile yapılmıştır. Deneyler sırasında sistemde dolaşan su-antifiriz karışımının debisini ölçmek için sirkülasyon pompasından sonra devreye bir adet su sayacı yerleştirilmiştir. Şekil 5.2’de su sayacının bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Su-antifiriz karışımının debisini ölçmek için kullanılan su saatinin görüntüsü

5.1.3. Basınç ölçümleri:

Şekil 5.3’de gösterildiği gibi ısı pompası sisteminde kompresörün emme ve basma hattına manometreler bağlanarak soğutucu akışkan basınçları ölçülmüştür.



Şekil 5.3. Sistemdeki manometrelerin görünümü

5.1.4. Güç ölçümleri:

Yapılan deneylerde sisteme Sanwa marka gerilim ölçer ve akım ölçer bağlanarak sistemin çektiği toplam güç bulunmuştur. Buradan çıkan sonucun kontrolü için ayrıca güç ölçer ve Cosφ ölçer de kullanılmıştır. Sistemde kullanılan gerilim ve akım ölçerlerin görünümü Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Sistemde kullanılan gerilim ve akım ölçerler

5.2. Deneylerin Yapılışı

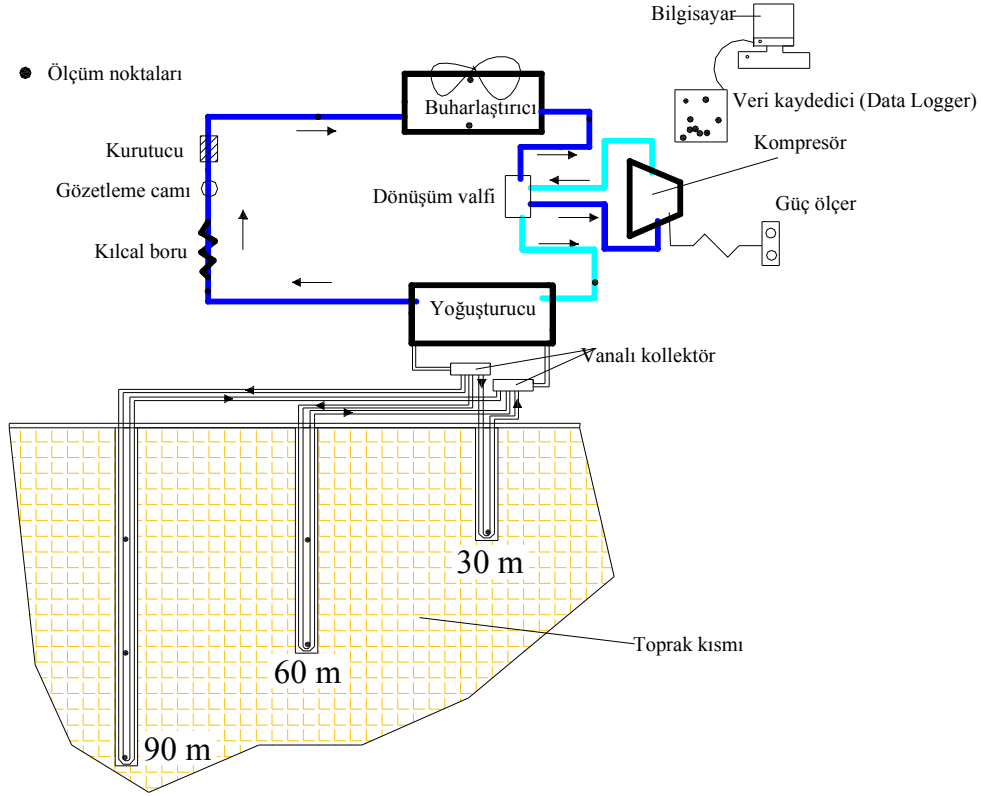
Burada amaç, deneyler sonucunda soğutma ve ısıtma modundaki performansları kıyaslamak değil kurulan sistemin soğutma ve ısıtma performanslarını kendi mevsimleri içinde üç farklı derinlikteki kuyular için değerlendirmektir. Çünkü, soğutma ve ısıtma için sistem bazında aynı şartlar sağlanamamıştır. Yaz ve kış uygulamaları olmak üzere iki farklı grup için deney yapılmıştır:

- Soğutma deneyleri
- Isıtma deneyleri

5.2.1. Soğutma deneyleri

Deneyler, 01.07.2006 – 28.09.2006 tarihleri arasında yapılmıştır. Soğutma deneyleri için kurulan sistemin şematik görünümü Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Sistem, üç ana kısımdan oluşmaktadır, bunlar; (a) su-antifriz karışımının toprakta dolaştığı 30, 60 ve 90 m'den oluşan U-borulu TID çevrimi, (b) soğutucu akışkan çevrimi, (c) fan (hava) çevrimidir. Sistemin ana bileşenleri ve karakteristik bilgileri Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Sistemin soğutma modu için şematik görünümü

Tablo 5.1. 2006 yılı için sistem ve çalışma şartlarına ait bazı parametrelerin ortalama değerleri

Yer: Elazığ, Türkiye (Enlem 38.41 °K; boylam 39.14 °D)	
<i>Hava bilgisi (yıllık ortalama değerler):</i>	
Ortalama dış hava sıcaklığı	287.14 (K)
Maksimum dış hava sıcaklığı	293.45 (K)
Minimum dış hava sıcaklığı	280.95 (K)
Ortalama relatif nem	48.37 (%)
Ortalama güneş ışınlamı şiddeti	357.71 (MJm ⁻² d ⁻¹)
Ortalama rüzgar hızı	2.12 (ms ⁻¹)
Ortalama toprak sıcaklığı (1 m)	289.78 (K)
<i>Oda bilgisi:</i>	
Pencere alanı	0.56 m ²
Duvar alanı	45.92 m ²
Döşeme alanı	15.12 m ²
Tavan alanı	16.8 m ²
Konfor sıcaklığı	293 K
<i>Isı pompası bilgisi:</i>	
Kapasite	4.279 kW
Kompresör tipi	Hermetic
Buharlaştırıcı tipi	TT3; bakır ve iç yüzeyi alüminyum
Yoğuşturucu tipi	HS 10; friterm
Kompresör giriş gücü	2 HP; 1.4 kW
Kompresör hacimsel debi	7.6 m ³ /h
Yoğuşturucu fanı	2350 m ³ /h, 145 W
Buharlaştırma sıcaklığı	0 °C
Yoğuşma sıcaklığı	54.5 °C
Soğutucu akışkan tipi	R-22
<i>Toprak ısı değiştiricisi bilgisi:</i>	
Konfigrasyon tipi	Düşey tekli
U-borusu malzemesi	Polietilen, SDR-11
U-boru uzunluğu	30, 60 ve 90 m
U-boru çapı	40 mm
Sondaj deliği çapı	150 mm
U-boruları arası mesafe	60 mm
<i>Sirkülasyon pompası bilgisi:</i>	
Tip	Alarko, NPVO-26-P
Güçler	40, 62, 83 W

Kış şartlarında TID içindeki akışkanın donmaması için kütleli olarak %20 propilen glikol + %80 su karışımı kullanılmıştır. Soğutucu akışkan Freon-22 olup, bakır borular vasıtasıyla kapalı çevrim ile dolaştırılmıştır. TKIP sistemi, yaz ve kış şartlarında dönüşümlü olarak çalıştırılmıştır. Kış şartlarında, TID içerisindeki su-antifiriz karışımı ısıyı topraktan çekerek ısıtılacak ortama taşımakta, yaz şartlarında ise bu işlemin tam tersi ile soğutulacak iç ortamın ısısı daha serin olan toprağa atılmaktadır.

Soğutma çevriminde, buharlaştırıcıda dolaştırılan soğutucu akışkan oda havasından çektiği ısı ile buharlaşır ve daha sonra kompresör tarafından emilerek sonra su-antifriz karışımı ile soğutucu akışkan arasındaki ısı geçişini sağlayan yoğuşturucuya basılır, burada su-antifriz karışımına ısısını terk ederek yoğuşan soğutucu akışkan kılcal borudan buharlaştırıcıya geçerek çevrimini tamamlanmış olur.

5.2.1.1. Soğutma çevrimi enerji analizi

Enerji analizi hesaplamaları soğutma ve ısıtma moduna göre farklı şekillerde yapılmaktadır. Soğutma durumunda, U-borusu içerisinde dolaştırılan su-antifriz karışımı tarafından toprağa atılan ısı miktarı Q_{sa} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{sa} = m_{sa} C_{p,sa} (T_{sa,\phi} - T_{sa,g}), \quad (5.1)$$

Burada; m_{sa} su-antifriz karışımının debisi (kg/s), $C_{p,sa}$ su-antifriz karışımının özgül ısısı (J/kg°C), $T_{sa,\phi}$ buharlaştırıcıdan toprağa giden su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C), $T_{sa,g}$ topraktan buharlaştırıcıya giren su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C)'dır. Kompresörün şebekeden çektiği güç $\dot{W}_k$, sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç $\dot{W}_{sp}$ ve buharlaştırıcı fanının şebekeden çektiği güç $\dot{W}_{bf}$, sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{W}_k = I_k U_k \cos\phi \quad (5.2)$$

$$\dot{W}_{sp} = I_{sp} U_{sp} \cos\phi \quad (5.3)$$

$$\dot{W}_{bf} = I_{bf} U_{bf} \cos\phi \quad (5.4)$$

Bu eşitliklerde, I akım, U gerilim, $\cos\phi$ güç katsayısıdır.

Yoğuşturucu sıcaklığı T_{yog} ve buharlaştırıcı sıcaklığı T_{buh} arasında çalışan bir ideal soğutma sistemi için maksimum soğutma performans katsayısı COP_{cc} , Carnot çevrimi olarak bilinen çevrimle elde edilir [100].

$$COP_{c,c} = \frac{T_{buh}}{T_{yog} - T_{buh}} \quad (5.5)$$

Isı pompası ünitesinin soğutma performans katsayısı (COP_{ip}) ve sistemin soğutma performans katsayısı (COP_{sis}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{W}_k} \quad (5.6)$$

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{W}_k + \dot{W}_{sp} + \dot{W}_{ef}} \quad (5.7)$$

Burada, $\dot{Q}_{buh}$, buharlaştırıcıdan odaya transfer olan ısı miktarını gösterir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{hava} C_{p,hava} (T_{hava,g} - T_{hava,\phi}) \quad (5.8)$$

(5.8) eşitliğinde, $\dot{m}_{hava}$ havanın debisini, $C_{p,hava}$ havanın özgül ısısını, $T_{hava,\phi}$ havanın buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığını, $T_{hava,g}$ havanın buharlaştırıcıya giriş sıcaklığını göstermektedir. Bu çalışmada yoğusturucu/buharlaştırıcı üzerinden akan havanın debisi bir dijital anemometreden (Lutron, AM-4206M) faydalanılarak 0.73 kg/s olarak ölçülmüştür. Konut ve küçük ticari yapılarda kullanılan soğutma sistemlerinin soğutma verimi daha çok Enerji Verim Oranı (EVO) veya Mevsimlik Enerji Verim Oranı (MEVO) terimleriyle açıklanır. Bu katsayılar Watt (kW değil) olarak kullanılan gücün pik günler (EVO) veya mevsimlik ortalama günler (MEVO) için Btu (ton olarak değil) olarak soğutma etkisine bölünmesiyle elde edilir [100]:

$$EVO = 3.412 COP_{ip} \quad (5.9)$$

burada EVO'nun birimi $BtuW^{-1}h^{-1}$ 'dir.

5.2.1.2. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda üzerinde durulması gereken önemli başka bir nokta, deneysel çalışmalardan hesaplanan değerler ile ölçülen değerlerin doğruluğunu göstermektir. Bu amaçla, deneysel çalışmanın doğruluğunu göstermek için belirsizlik analizini yapmak gerekir [101]. Herhangi bir parametrenin değerinin ölçülmesinde ortaya çıkan belirsizlikler ($w_{x1}, w_{x2}, \dots, w_{xn}$) dikkate alınarak toplam belirsizlik (TB) hesabı aşağıdaki Eşitlik (5.10)'daki gibi yazılabilir.

$$TB = [(w_{x1})^2 + (w_{x2})^2 + \dots + (w_{xn})^2]^{1/2} \quad (5.10)$$

Deneysel çalışmanın sonucunda ortaya çıkan R fonksiyonu, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ gibi bağımsız parametrelerin fonksiyonudur. Çeşitli bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan sonuç belirsizliği (w_R), Kline ve McClintock tarafından Eşitlik (5.11)'deki gibi hesaplanmıştır [101].

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

burada R, $x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenleri için verilmiş bir sonuç fonksiyonudur. $w_1, w_2, \dots, w_n$ ise bağımsız değişkenlerin belirsizlikleridir.

Bu çalışmada ölçülen sıcaklıklar, kütsel debiler, basınçlar, gerilimler ve akımlar için TB değerleri elde edilmiştir. COP_{ip} ve COP_{sis} değerinin belirsizlikleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır:

$$w_{COP_{ip}} = \left[\left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial \dot{m}_{hava}} w_{\dot{m}_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial C_{p,hava}} w_{C_{p,hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial T_{hava,\phi}} w_{T_{hava,\phi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial T_{hava,g}} w_{T_{hava,g}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial W_k} w_{W_k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

$$w_{COP_{sis}} = \left[\left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial \dot{m}_{hava}} w_{\dot{m}_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial C_{p,hava}} w_{C_{p,hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial T_{hava,\phi}} w_{T_{hava,\phi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial T_{hava,g}} w_{T_{hava,g}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_k} w_{W_k} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_{sp}} w_{W_{sp}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_{ef}} w_{W_{ef}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.13)$$

COP için belirsizlik hesaplamaları yapılırken bu belirsizliği etkileyen ölçmeler ve ilgili bilgiler Tablo 5.2'de verilmiştir [102]:

Tablo 5.2. Isı pompası ünitesi belirsizlikleri

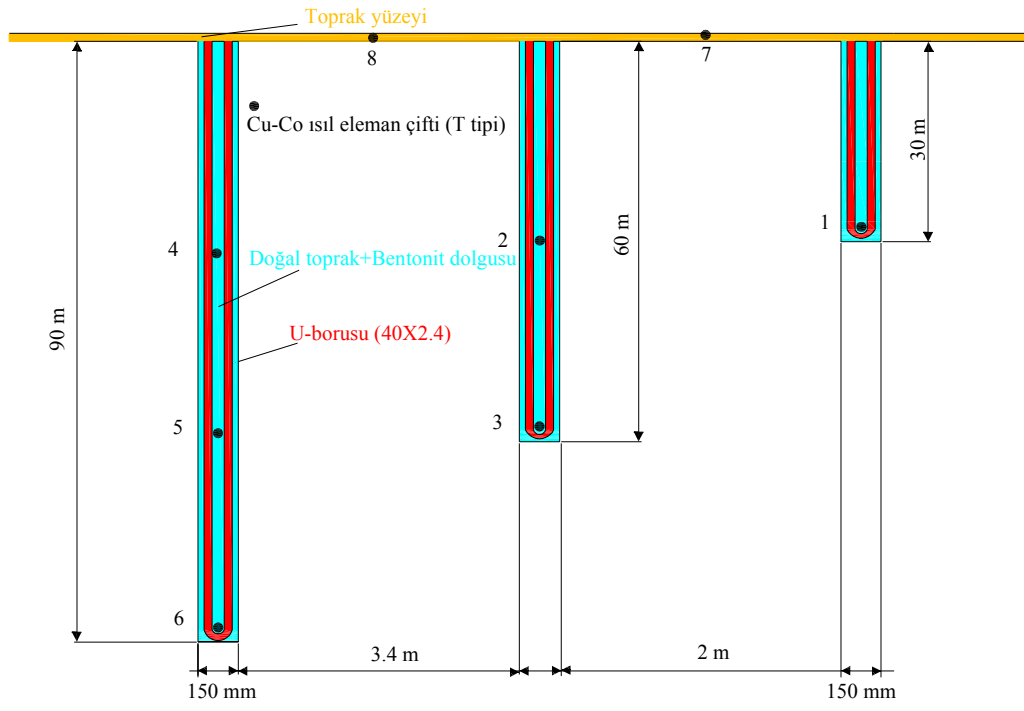
Parametre	Belirsizlik
Sıcaklık	± 0.6 °C
Basınç	± 2.24 kPa (düşük basınç tarafı)
	± 4.48 kPa (yüksek basınç tarafı)
Entalpi	± 0.4 kJ/kg (R-22 düşük basınç tarafı)
	± 0.8 kJ/kg (R-22 yüksek basınç tarafı)
	± 0.6 kJ/kg (R-410a düşük basınç tarafı)
	± 1 kJ/kg (R-410a yüksek basınç tarafı)
<i>Soğutucu akışkan</i>	
Akış miktarı	% ± 0.25 okumadan dolayı
<i>Kompresör</i>	
Güç	± 0.02 kW

Performans deneylerinin gerçekleştirildiği 2006 yılı soğutma sezonunda Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü [103] tarafından ölçülen Elazığ'a ait bazı iklimsel veriler Tablo 5.3'de verilmiştir:

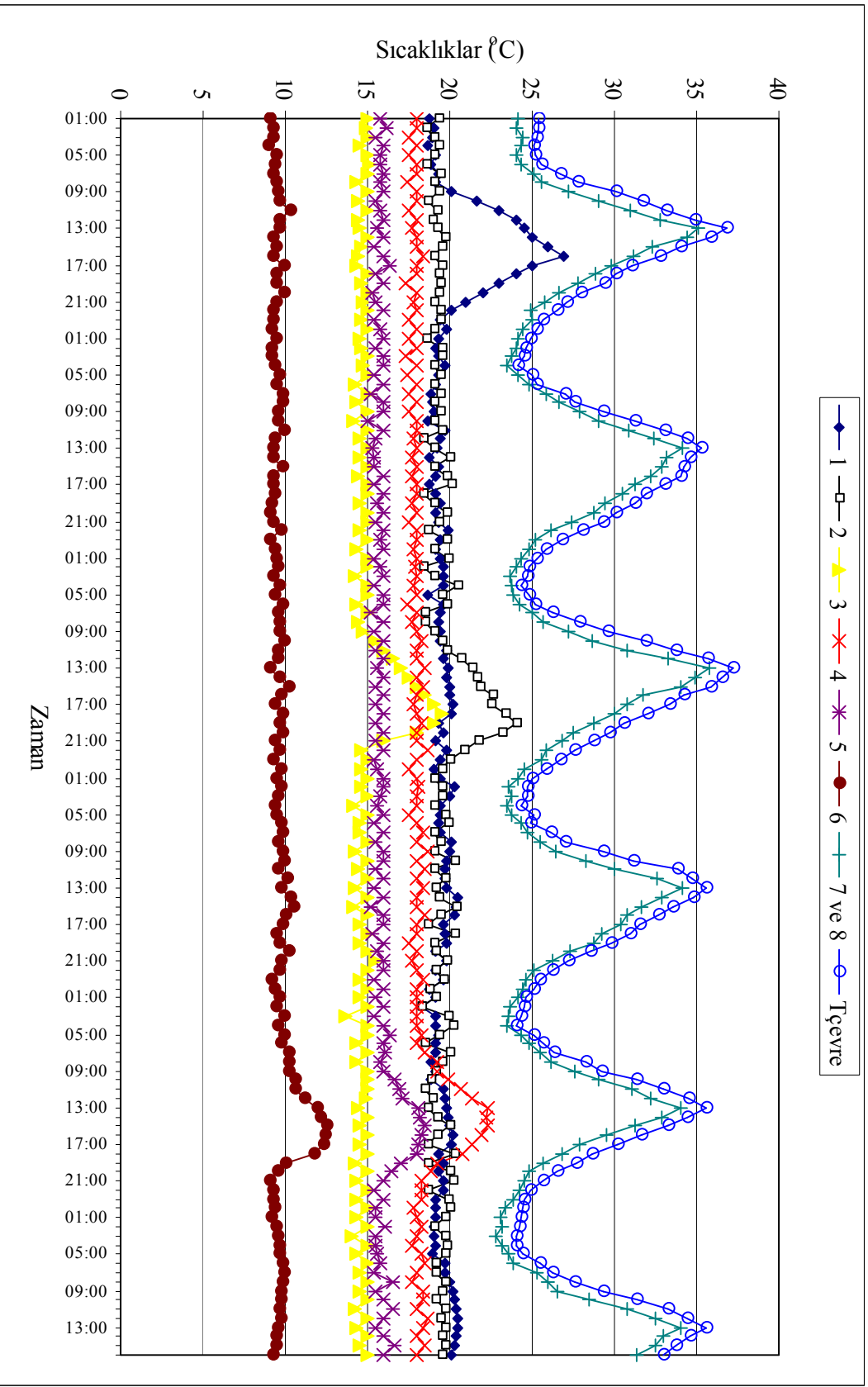
Tablo 5.3. Elazığ ilinin 2006 yılı soğutma sezonundaki iklimsel verileri

	Aylar			
	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.
Ortalama dış hava sıcaklığı (°C)	26.3	27.5	29.5	21.3
Minimum dış hava sıcaklığı (°C)	16.8	19.6	20.9	13.7
Maksimum dış hava sıcaklığı (°C)	33.7	34.4	38	29.4
Ortalama bağıl nem (%)	29.8	33.3	25.6	35
Ortalama güneş ışınlamı (cal/cm ² saat)	589.74	550.08	474.30	433.41
1 m derinliğindeki ortalama toprak sıcaklığı (°C)	21.2	24.8	26.8	26

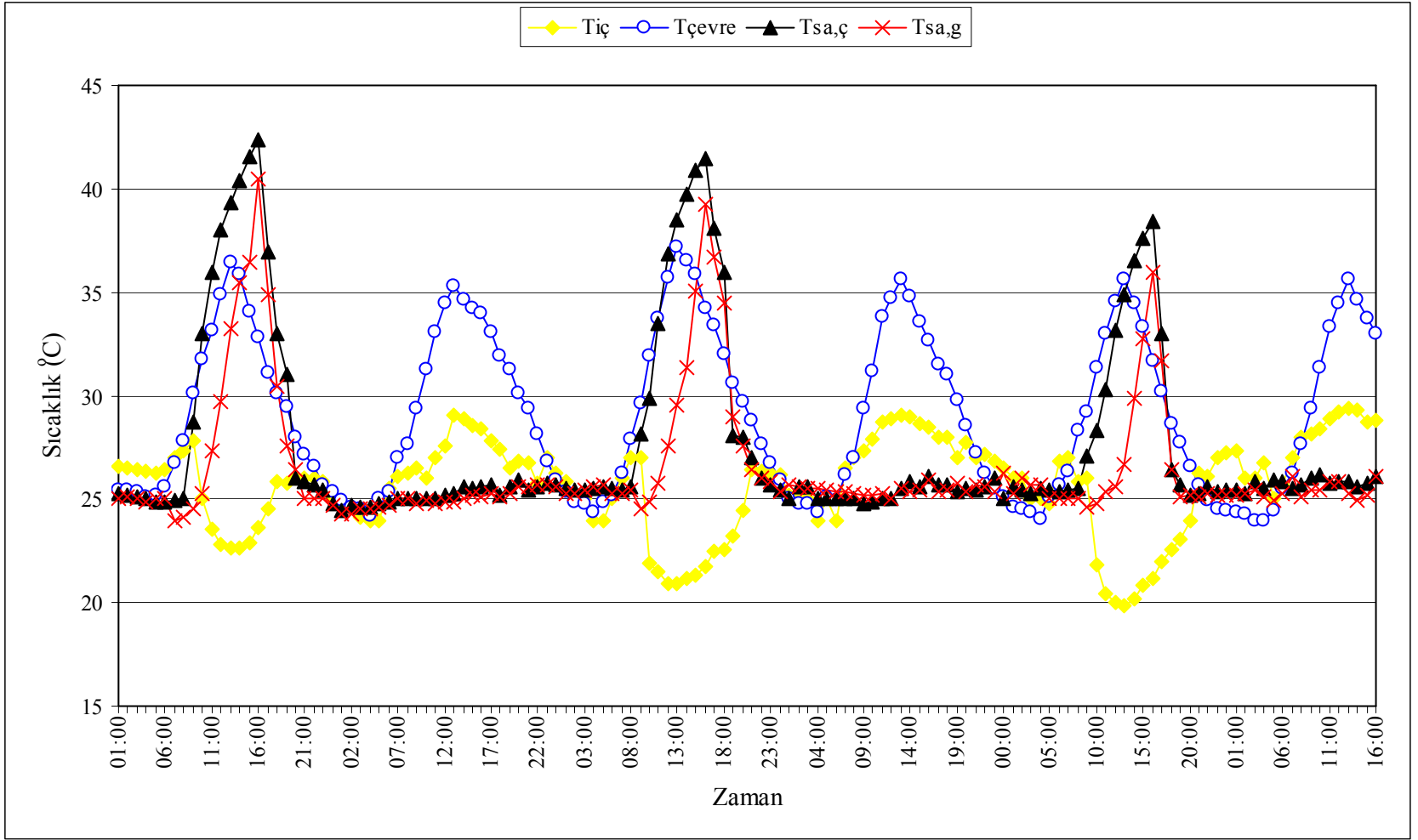
2006 yılı soğutma sezonunda 30, 60 ve 90 m derinliğindeki TID sistemlerinin ısı pompası performansına etkisini incelemek için ilk deneyler ardı ardına beş günde gerçekleştirilmiştir. Yani 30 m derinliğindeki TID sisteminin çalışması, 01.07.2006 sabah saat



Şekil 5.7. Sondaj kısmın şematik görünüşü



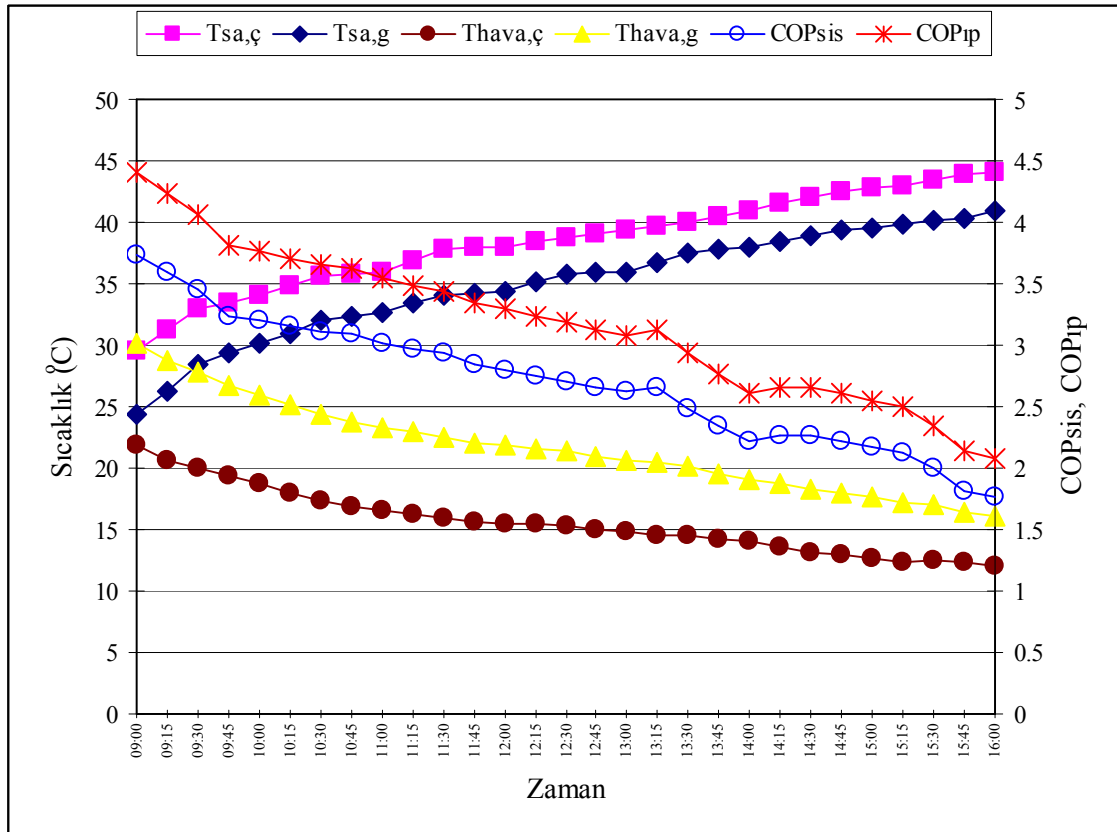
Şekil 5.8. Farklı derinlikteki toprak sıcaklıkları ile dış hava sıcaklığının zamanla değişimi (01.07.2006 – 06.07.2006)



Şekil 5.9. Çevre ve iç ortam sıcaklıkları ile su-antifriz sıcaklıklarının zamanla değişimi (01.07.2006 – 06.07.2006)

Soğutma deneyleri için elde edilen performans eğrileri aşağıdaki grafiklerde (Şekil 5.10 - Şekil 5.17) verilmiştir. Soğutma mevsiminin en sıcak günlerinde sistemin şebekeden çektiği ortalama güç, 1600 Watt ($TB=\%4.35$) iken, sadece kompresörün şebekeden çektiği ortalama güç 1400 Watt ($TB=\%4.35$)'dır. Sirkülasyon pompasının gücü derinlik değiştikçe farklılık göstermekte olup 30, 60 ve 90 m'lik sistemler için bu güçler sırasıyla, 40, 62 ve 83 Watt'dır. Aynı dönemlerde, buharlaştırıcı basıncı 350 kPa ($TB=\%2.72$) iken, yoğuşturucu basıncı 1750 kPa ($TB=\%2.72$)'dır.

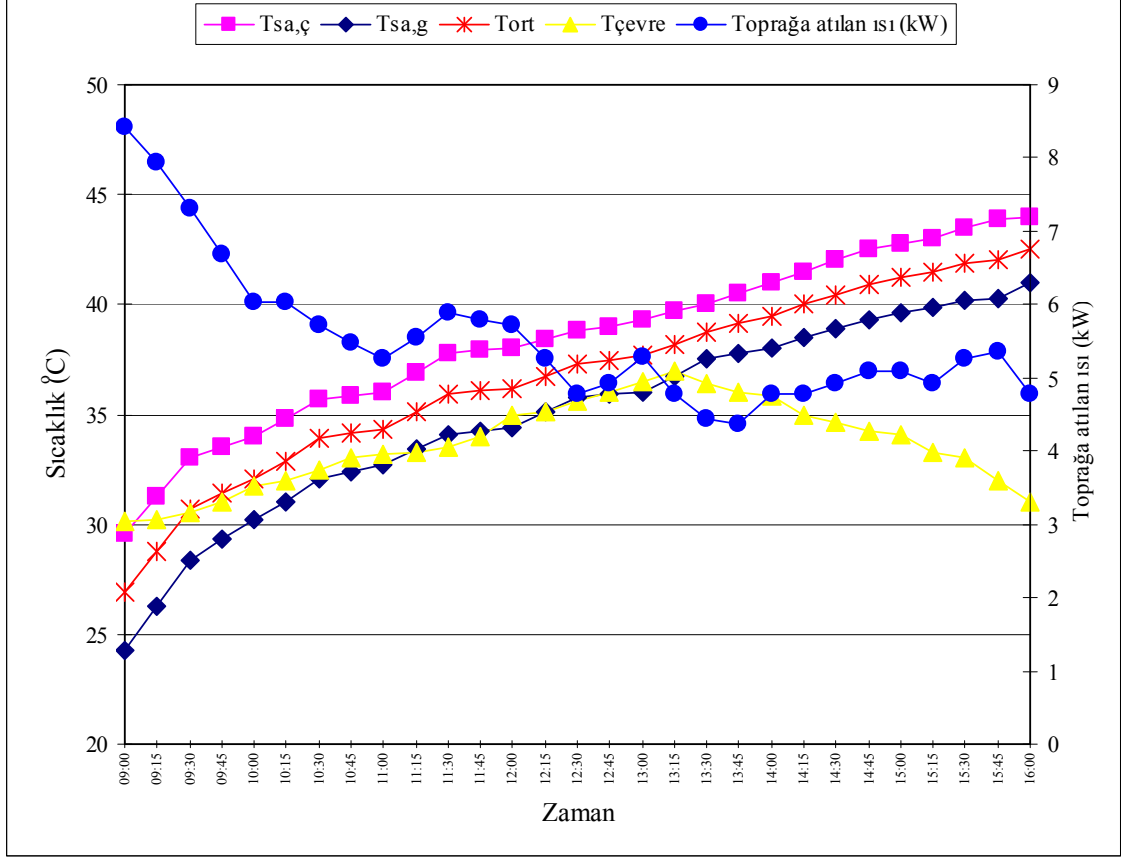
Şekil 5.10'da 30 m'lik sondaj kuyusu için soğutma periyodunda $T_{sa,\phi}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,\phi}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifriz karışımı sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,\phi}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 3.48 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde önemli bir parametre olan $T_{sa,g}$ sıcaklığı maksimum 41 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklıktaki en düşük COP_{sis} ve COP_{ip} değerleri sırasıyla 1.77 ve 2.08 iken deney süresince bu değerlerin ortalaması sırasıyla 2.69 ve 3.17 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.10. 30 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

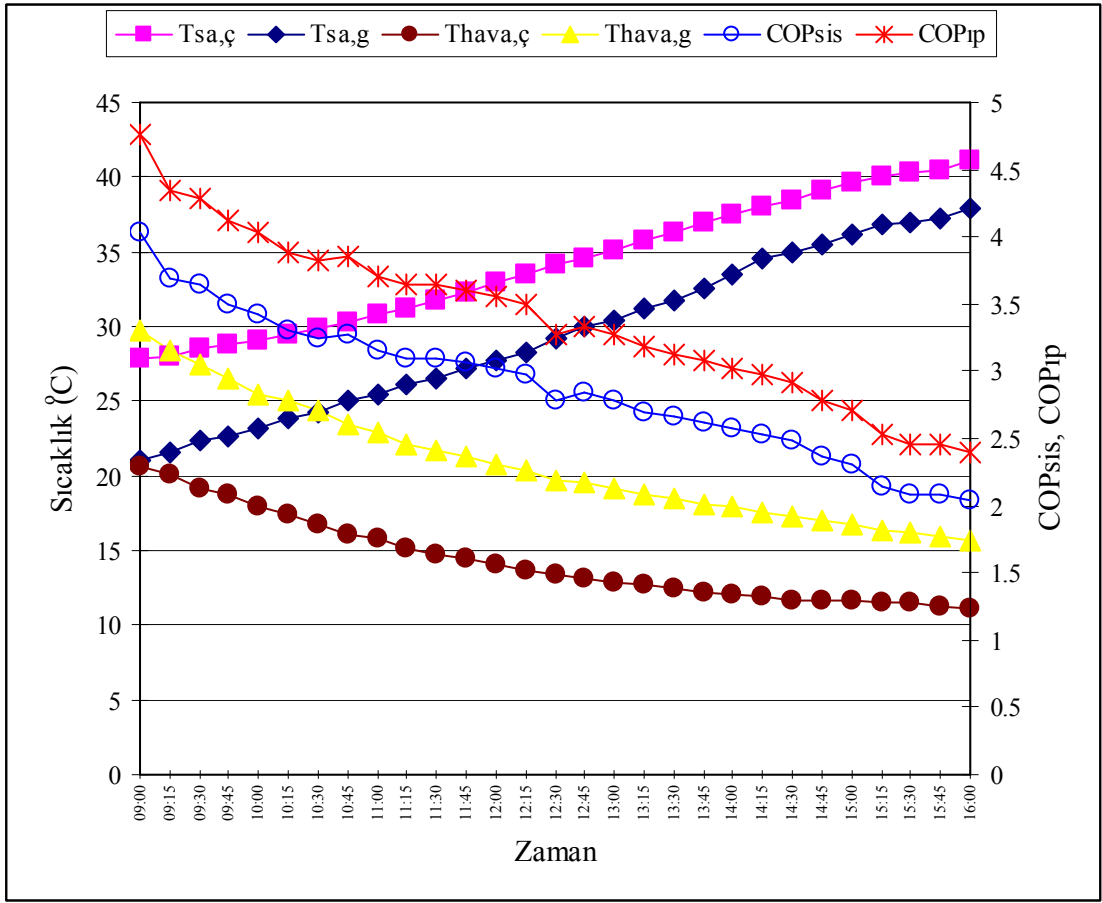
Sistemde dolaşan su-antifriz karışımının ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının ve toprağa atılan ısı miktarının zamanla değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Deney süresince

toprağa atılan maksimum ısı miktarı 8.43 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 5.53 kW'dır.



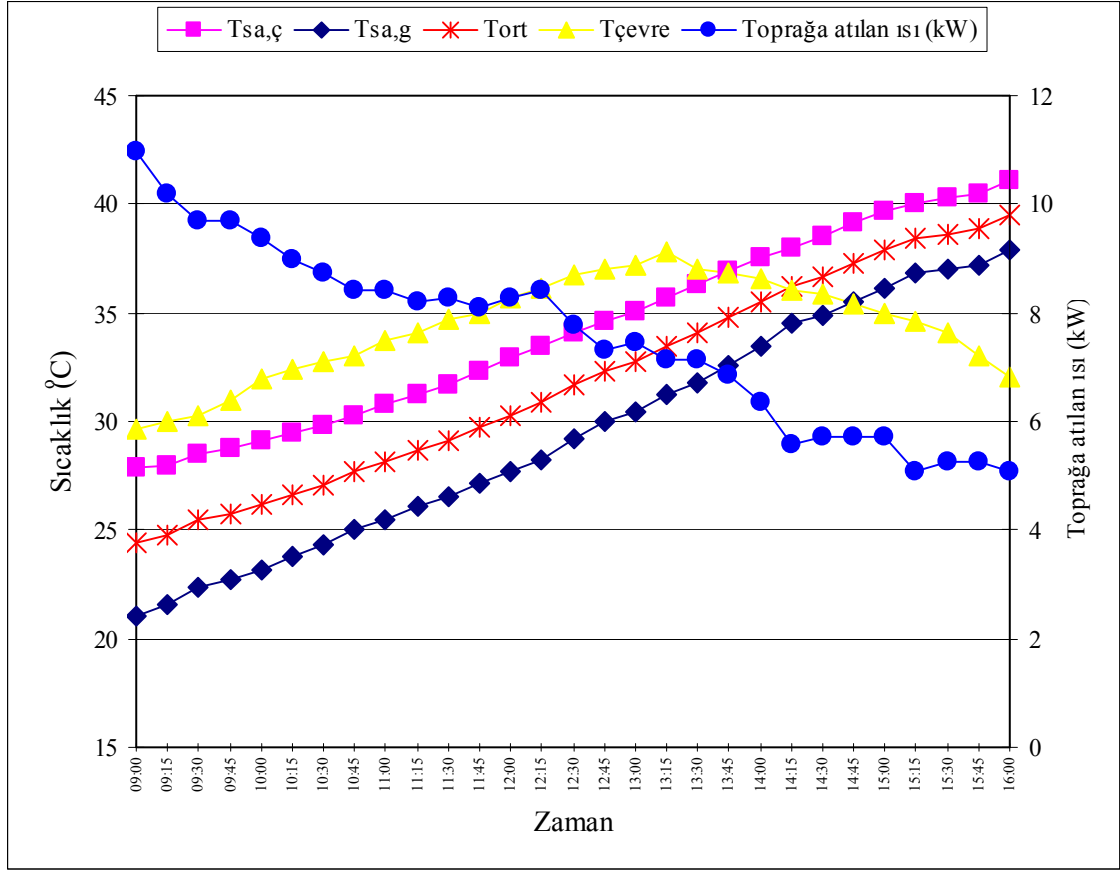
Şekil 5.11. 30 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarının ve ısı yükünün zamanla değişimi

Şekil 5.12'de 60 m'lik sondaj kuyusu için soğutma periyodunda $T_{sa,\text{ç}}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,\text{ç}}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifriz sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,\text{ç}}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 4.75 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde önemli bir parametre olan $T_{sa,g}$ sıcaklığı maksimum 37.9 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklıktaki en düşük COP_{sis} ve COP_{ip} değerleri sırasıyla 2.04 ve 2.4 iken, deney süresince bu değerlerin ortalaması sırasıyla 2.88 ve 3.39 olarak hesaplanmıştır.



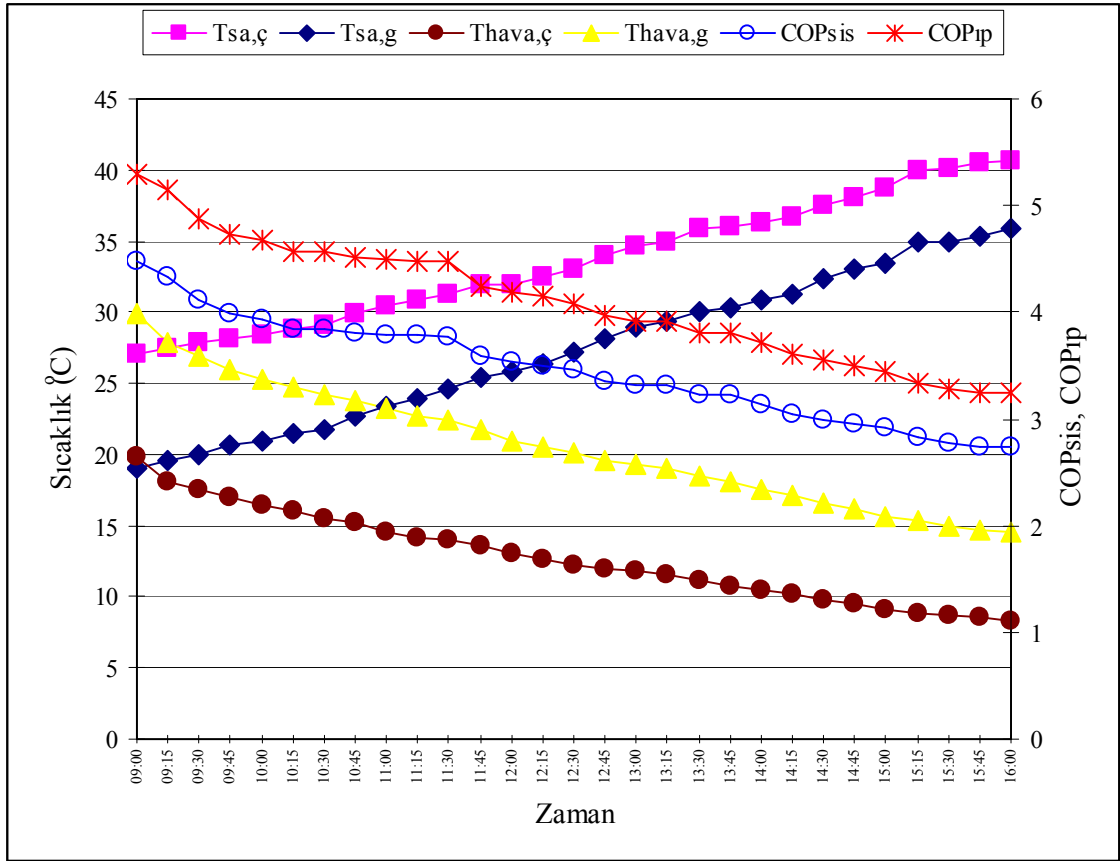
Şekil 5.12. 60 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

Sistemde dolaşan su-antifiriz karışımının ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının ve toprağa atılan ısı miktarının zamanla değişimi Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Deney süresince toprağa atılan maksimum ısı miktarı 10.98 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 7.56 kW'dır.



Şekil 5.13. 60 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi

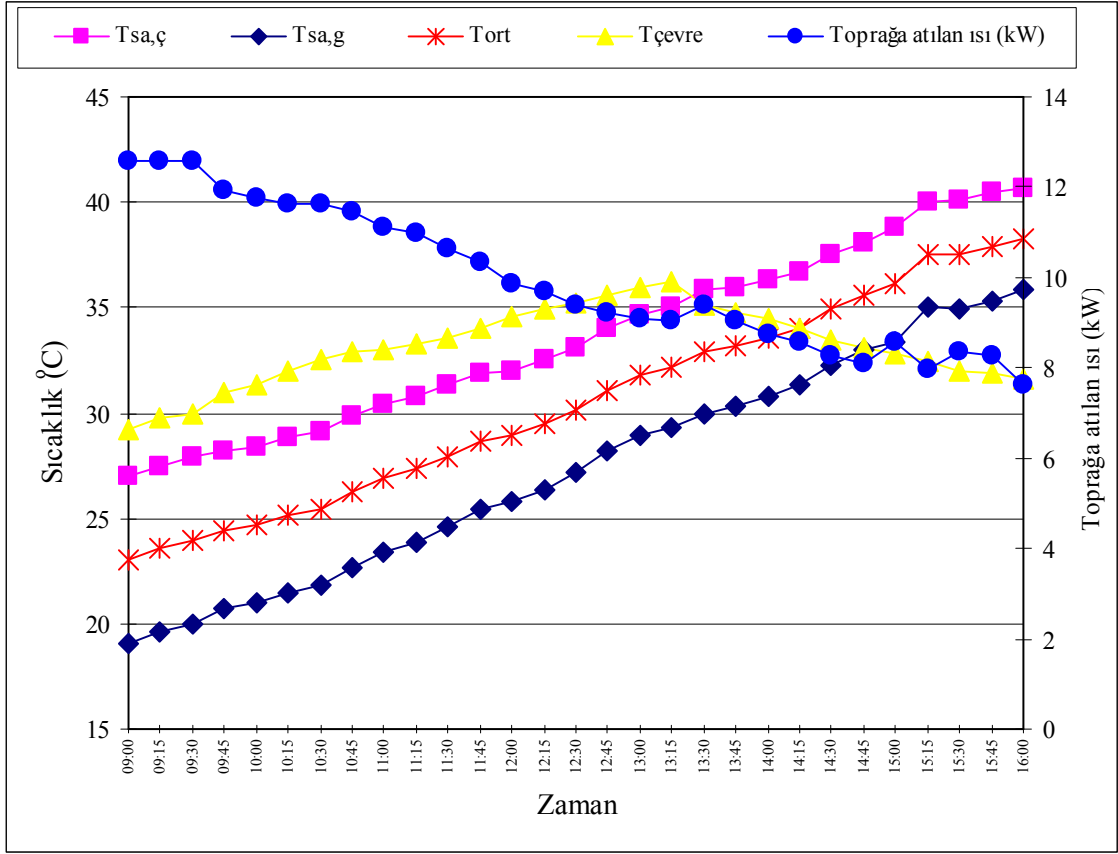
Şekil 5.14'de 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken soğutma periyodunda $T_{sa,ç}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,ç}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifriz sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,ç}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 6.25 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde önemli bir parametre olan $T_{sa,g}$ değeri maksimum 35.9 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklıkta, en düşük COP_{sis} ve COP_{ip} değerleri sırasıyla 2.73 ve 3.24 olarak hesaplanmışken deney süresince bu değerlerin ortalaması sırasıyla 3.45 ve 4.12 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14. 90 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

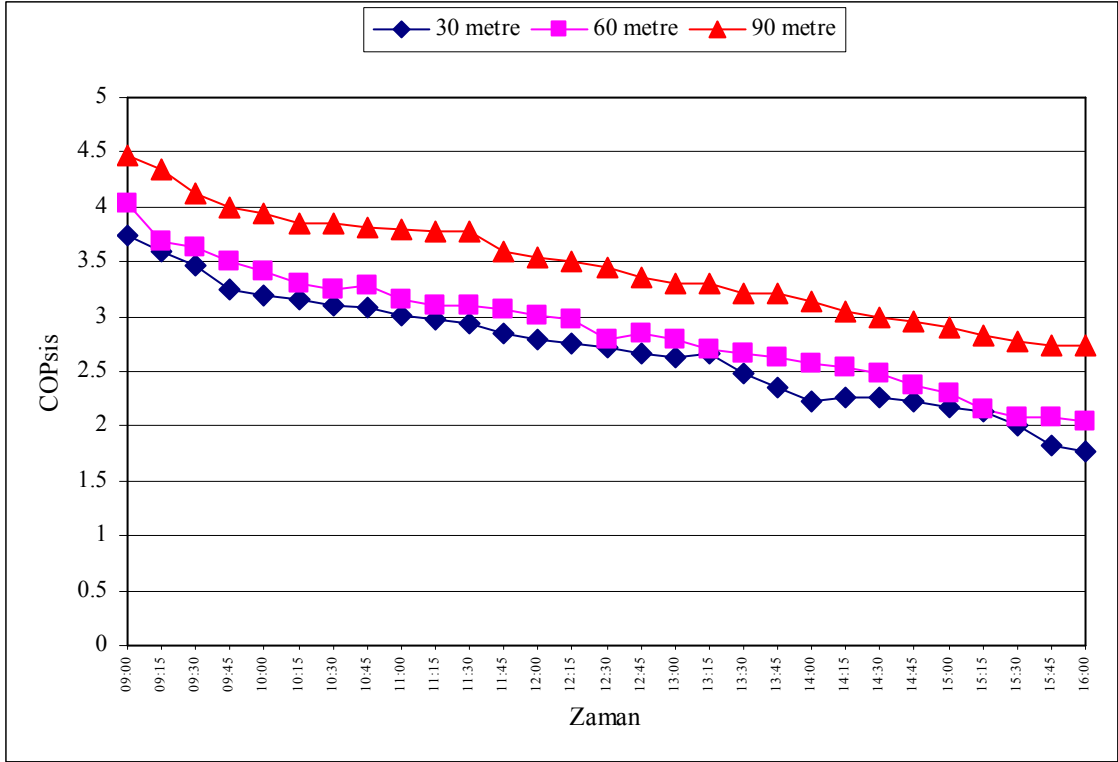
Sistemde dolaşan su-antifriz karışımının deney süresince ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının ve toprağa atılan ısı miktarının zamanla değişimi Şekil 5.15'de verilmiştir. Deney süresince toprağa atılan maksimum ısı miktarı 12.56 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 9.94 kW'dır.

Soğutma modunda yapılan deneylere göre toprağa atılan ısı miktarı en yüksek 90.3 W/m iken en düşük değeri de 49.1 W/m olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki bir çalışmada [31], tipik toprak şartları ve tekli U-tipli TID için birim boru boyunca atılan ısı miktarı 50 W/m iken, başka bir çalışmada [50] bu değer 50-80 W/m olarak saptanmıştır.



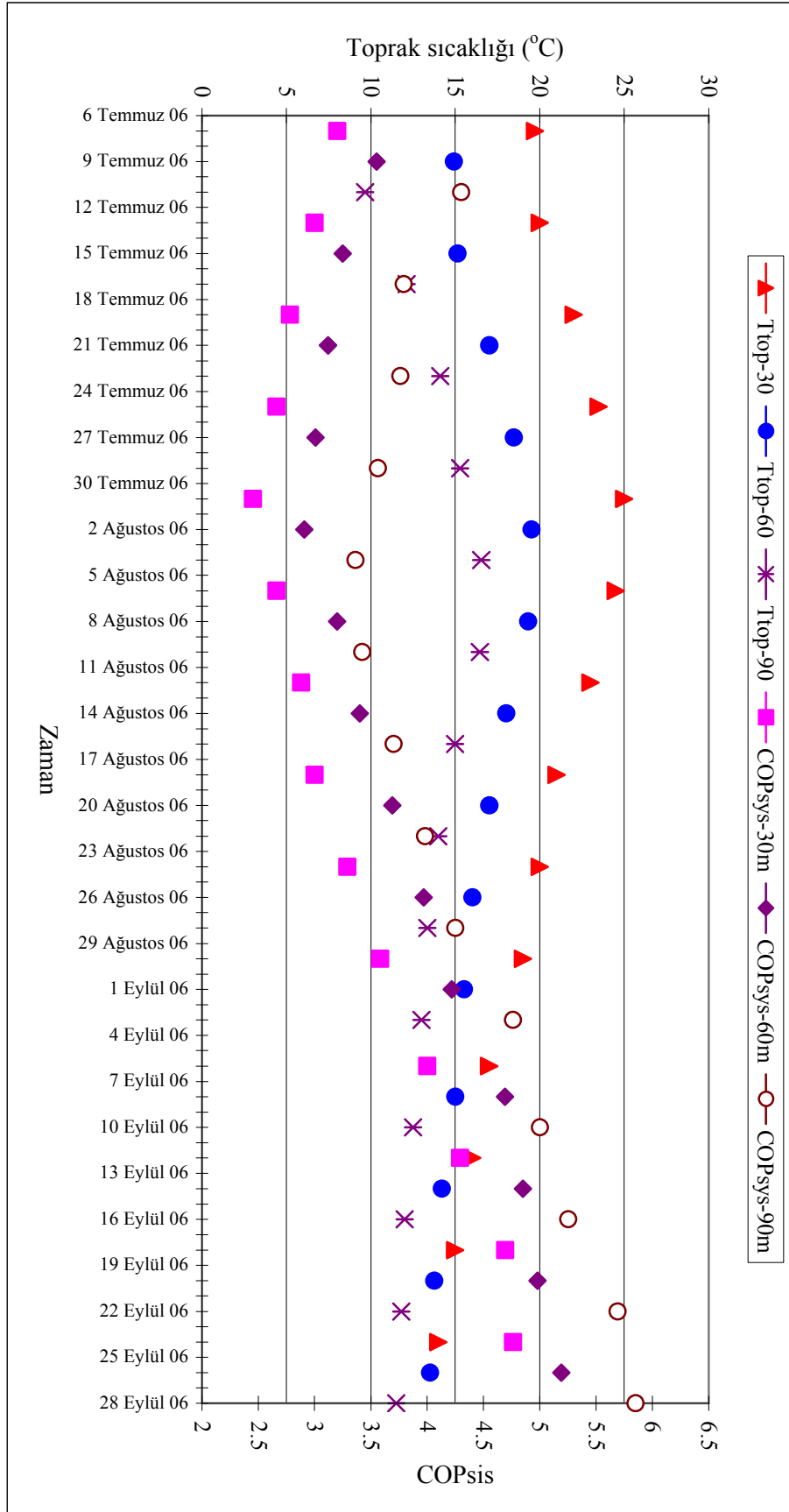
Şekil 5.15. 90 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi

Soğutma periyodunda üç günlük deneylerden elde edilen COP_{sis} değişimleri üç farklı derinlikteki kuyu için Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Bu şekil'den görüldüğü gibi yazın derinlik arttıkça daha soğuk toprağa ısı atıldığı için ve dolayısıyla mahaldeki ısı pompası ünitesine daha uygun (daha soğuk) bir ısı kuyusu sağlandığı için daha iyi sistem performansı elde edilmiştir. Üç gün boyunca saat 09:00 ile 16:00 arasında alınan ölçümlerde ortalama COP_{sis} değerleri 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için sırasıyla 2.69, 2.88 ve 3.45 olarak bulunmuştur. Ardışık 3 günde deney yapıldığı için çevre ve toprak şartlarının yaklaşık aynı kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.16. Üç farklı kuyu derinliği için COP_{sis} değerinin zamanla değişimi

2006 yılı soğutma döneminde 06 Temmuz ile 28 Eylül tarihleri arasında yapılan deneylerde TKIP sisteminin uzun süreli davranışını araştırmak için çalışmalar yapılmıştır. 30, 60 ve 90 m derinlikteki toprak sıcaklıkları ile bu derinliklere ait sistemlerin çalıştırılması sonucu elde edilen COP_{sis} değişimleri Şekil 5.17’de verilmiştir. Bu şekil’den görüldüğü gibi toprak sıcaklıkları, Ağustos ayının ilk dönemlerine kadar artış göstermekte buna paralel bir şekilde COP_{sis} değerleri düşmektedir. Ancak daha sonraki dönemlerde toprak sıcaklıkları düştüğü için soğutma performans katsayısı COP_{sis} ’nin değeri artmaya başlar. Deneyler süresince 30, 60 ve 90 m’lik kuyularda ölçülen ortalama toprak sıcaklıkları sırasıyla 19.97, 16.23 ve 13.37 °C iken bu değerlere karşın COP_{sis} değerleri de sırasıyla 3.37, 3.85 ve 4.33’dür.



Şekil 5.17. Soğutma periyodunda sistemin uzun süreli performansı

Soğutma periyodunun pik günlerinde elde edilen Enerji Verimlilik Oranı (EVO) aşağıdaki gibidir:

30 metre için EVO değeri.....8.29 BtuW⁻¹h⁻¹

60 metre için EVO değeri.....9.58 BtuW⁻¹h⁻¹

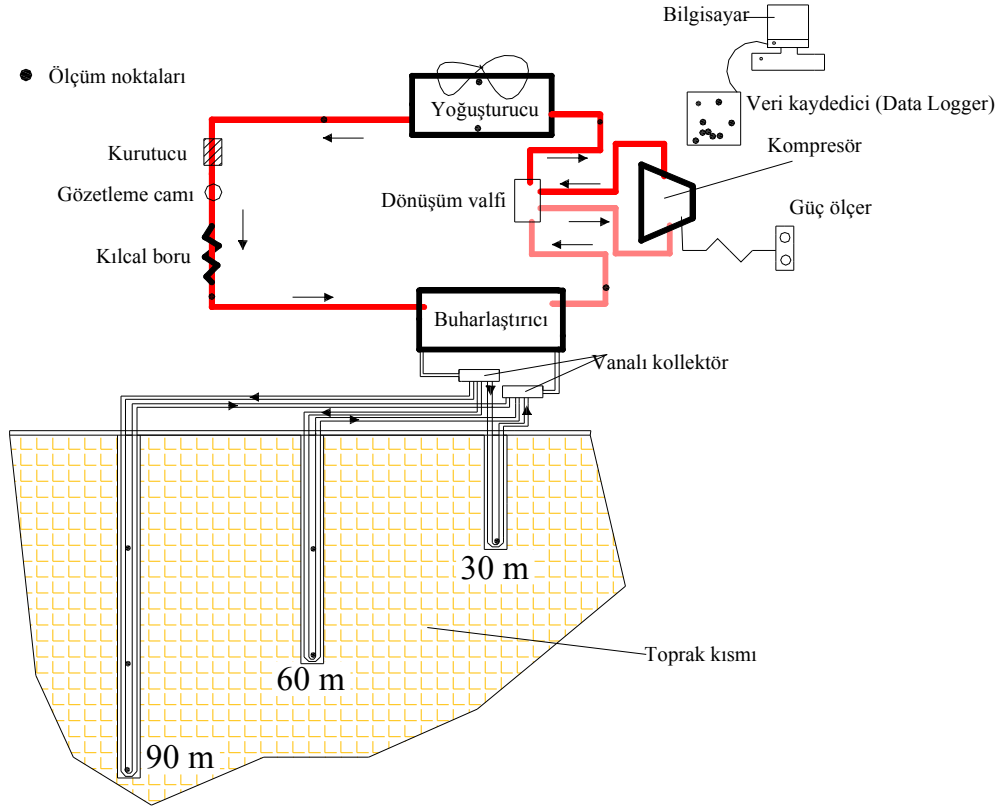
90 metre için EVO değeri.....11.15 BtuW⁻¹h⁻¹

Amerika’da federal standartlara göre minimum EVO değeri 9 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, EVO değeri en az 10.5 olan cihazların kullanılması önerilmektedir [104].

5.2.2. Isıtma deneyleri

Sistemin ısıtma durumundaki şematik görünümü Şekil 5.18’de gösterilmektedir. Sistem, üç ana kısımdan oluşmaktadır, bunlar; (a) su-antifriz karışımının toprakta dolaştığı 30, 60 ve 90 m’den oluşan U-borulu TID çevrimi, (b) soğutucu akışkan çevrimi, (c) fan (hava) çevrimidir.

Deneyler yapılırken aynı şartlar oluşturulmaya çalışılmış, fakat sistemdeki bazı problemler (soğutucu akışkan gaz ilavesi ve su-antifriz akışkanı ayarlaması, bakır boru değişiklikleri, vb.) yüzünden soğutma ve ısıtma performanslarını kıyaslamak mümkün olmamıştır. Ayrıca soğutma ve ısıtmada kompresör yükü değişiklik göstermiştir. Isıtma performans deneyleri 01.11.2006 ile 28.02.2007 tarihleri arasında yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Öncelikle 30 m’lik kuyu devreye sokulmuştur.



Şekil 5.18. Deney düzeneğinin ısıtma modu için şematik görünüşü

Soğutucu akışkan Freon-22 olup bakır borular vasıtasıyla kapalı çevrimde dolaştırılmıştır. Kış şartlarında, TID içerisindeki su-antifriz karışımı ısıyı topraktan çekerek ısıtılacak ortama atmaktadır. Isıtma çevriminde, toprakta dolaştırılan su-antifriz karışımı topraktan ısı çekerek buharlaştırıcıya ısıyı aktarır, buharlaştırıcıda soğutucu akışkan buharlaştıktan sonra hermetik kompresör tarafından yoğuşturucuya basılır ve yoğuşturucu boyunca dolaştırılan soğutucu akışkan odaya atılan ısı sayesinde yoğuştuğundan sonra kılcal boruya girer. Soğutucu akışkanın, kılcal borudan geçirilerek basıncı düşürüldükten sonra buharlaştırıcıya tekrar dönmesi ile çevrim tamamlanmış olur. Bir fan sayesinde yoğuşturucuyla temas eden hava, odaya üflenerek ortam ısıtılmıştır. 30, 60 ve 90 m derinliğindeki TID sistemlerinin el ile kontrolü için vanalar kullanılmıştır. Sistemde elektrik harcayan kompresör, sirkülasyon pompası ve yoğuşturucu fanının şebekeden çektiği güçler, güç ölçer ile ölçülmüştür. Sistemin çeşitli noktalarında bakır ve plastik borular üzerinden sıcaklıklar T tipi bakır-konstantan ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Tüm sıcaklıklar, çok kanallı bir CR10X data kaydedici (data logger) ile kaydedilmiştir. Çevre ve iç ortam hava sıcaklıkları termometreler yardımıyla, kompresörün girişi ve çıkışındaki soğutucu akışkan basınç değerleri ise manometreler ile ölçülmüştür. Isıtma ve soğutma durumlarının dönüşümünü sağlamak için dört yollu vana kullanılmıştır.

Performans deneylerinin gerçekleştirildiği 2006-2007 yılı ısıtma sezonunda Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü [103] tarafından ölçülen Elazığ'a ait bazı iklimsel veriler Tablo 5.4'de verilmiştir:

Tablo 5.4. Elazığ ilinin 2006 yılı ısıtma sezonundaki iklimsel verileri

	Aylar			
	Kasım-06	Aralık-06	Ocak-07	Şubat-07
Ortalama dış hava sıcaklığı (°C)	6.4	0.7	-2.1	1.6
Minimum dış hava sıcaklığı (°C)	1.7	-4.2	-5.5	-2.2
Maksimum dış hava sıcaklığı (°C)	13	7.7	2.2	6.2
Ortalama bağıl nem (%)	57.4	43.3	72.2	68.1
Ortalama anlık güneş ışıınımı (cal/cm ² .saat)	207.52	180.43	157.06	215.98
1 m derinliğindeki ortalama toprak sıcaklığı (°C)	16.2	11.2	7.5	6.6

5.2.2.1. Isıtma çevrimi için enerji analizi

Isıtma durumunda, U-borusu içerisinde dolaştırılan su-antifriz karışımı ile topraktan çekilen ısı miktarı Q_{sa} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{sa} = m_{sa} C_{p,sa} (T_{sa,g} - T_{sa,\varphi}), \quad (5.14)$$

Burada; m_{sa} su-antifriz karışımının debisi (kg/s), $C_{p,sa}$ su-antifriz karışımının özgül ısısı (J/kgK), $T_{sa,g}$ topraktan çıkıp buharlaştırıcıya giren su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C), $T_{sa,\varphi}$ buharlaştırıcıdan çıkıp toprağa giden su-antifriz karışımının sıcaklığı (°C)'dir. Kompresörün şebekeden çektiği güç $\dot{W}_k$, sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç $\dot{W}_{sp}$ ve yoğuşturucu fanının şebekeden çektiği güç $\dot{W}_{yf}$, sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{W}_k = I_k U_k \cos\varphi \quad (5.15)$$

$$\dot{W}_{sp} = I_{sp} U_{sp} \cos\varphi \quad (5.16)$$

$$\dot{W}_{yf} = I_{yf} U_{yf} \cos\varphi \quad (5.17)$$

Bu eşitliklerde, I akım, U gerilim, $\cos \varphi$ güç katsayısıdır. Yoğuşturucu sıcaklığı $T_{yoğ}$ ve buharlaştırıcı sıcaklığı T_{buh} olan bir ideal ısı pompası için maksimum ısıtma performans katsayısı COP_{cc} Carnot çevrimi olarak bilinen çevrimle elde edilir [100];

$$COP_{c,c} = \frac{T_{yoğ}}{T_{yoğ} - T_{buh}} \quad (5.18)$$

Isı pompası ünitesinin performans katsayısı (COP_{ip}) ve sistemin performans katsayısı (COP_{sis}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_{yoğ}}{\dot{W}_k} \quad (5.19)$$

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{yoğ}}{\dot{W}_k + \dot{W}_{sp} + \dot{W}_{yf}} \quad (5.20)$$

Burada, $\dot{Q}_{yoğ}$ odaya yoğuşturucu tarafından atılan ısıyı göstermektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{hava} C_{p,hava} (T_{hava,ç} - T_{hava,g}) \quad (5.21)$$

Burada, $\dot{m}_{hava}$ havanın debisini, $C_{p,hava}$ havanın özgül ısısını, $T_{hava,ç}$ havanın yoğuşturucudan çıkış sıcaklığını, $T_{hava,g}$ havanın yoğuşturucuya giriş sıcaklığını göstermektedir.

5.2.2.2. Belirsizlik analizi

Isıtma modu için COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin belirsizlikleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır:

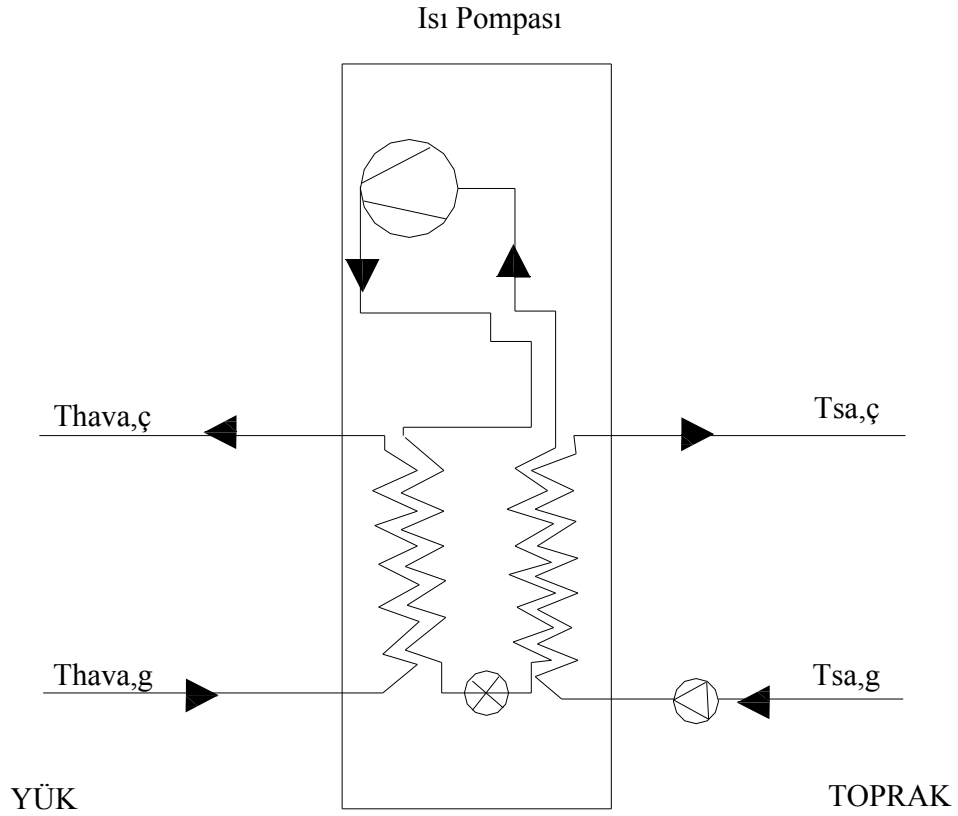
$$W_{COP_{ip}} = \left[\left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial \dot{m}_{hava}} W_{\dot{m}_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial C_{p,hava}} W_{C_{p,hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial T_{hava,ç}} W_{T_{hava,ç}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial T_{hava,g}} W_{T_{hava,g}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{ip}}{\partial W_k} W_{W_k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.22)$$

$$W_{COP_{sis}} = \left[\left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial \dot{m}_{hava}} W_{\dot{m}_{hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial C_{p,hava}} W_{C_{p,hava}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial T_{hava,\zeta}} W_{T_{hava,\zeta}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial T_{hava,g}} W_{T_{hava,g}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_k} W_{W_k} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_{sp}} W_{W_{sp}} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP_{sis}}{\partial W_{yf}} W_{W_{yf}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.23)$$

2006 yılı ısıtma sezonunda 30, 60 ve 90 m derinliğindeki TID sistemlerinin ısı pompası performansına etkisini incelemek için ilk deneyler ardı ardına beş günde gerçekleştirilmiştir. Yani 30 m derinliğindeki TID sistemin çalışması, 10.11.2006 sabah saat 9:00'da başlamış, saat 16:00'da sona ermiştir. 11.11.2006 tarihinde ise sistem çalıştırılmamıştır. Sistemin birer gün aralıklarla çalıştırılmasının nedeni, ısı pompası ünite kısmının üç kuyu için de eşit şartlarda olması içindir.

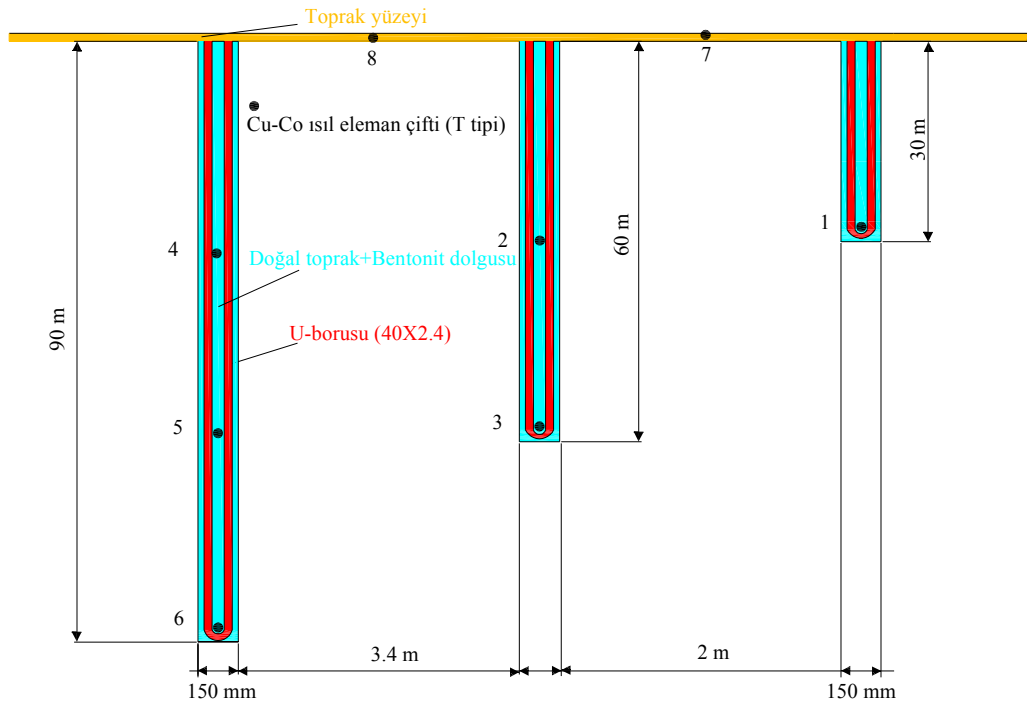
12.11.2006 tarihinde 60 m'lik sistem saat 9:00'da devreye girmiştir, saat 16:00'da kapatılmıştır. 13.11.2006 tarihinde sistem çalıştırılmamıştır. 14.07.2006 tarihinde ise 90 m'lik sistem saat 09:00'da çalıştırılmıştır ve saat 16:00'da durdurulmuştur.

TKIP sisteminde dolaşan su-antifriz karışımı ve hava akışının ısıtma periyodundaki akış şeması Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

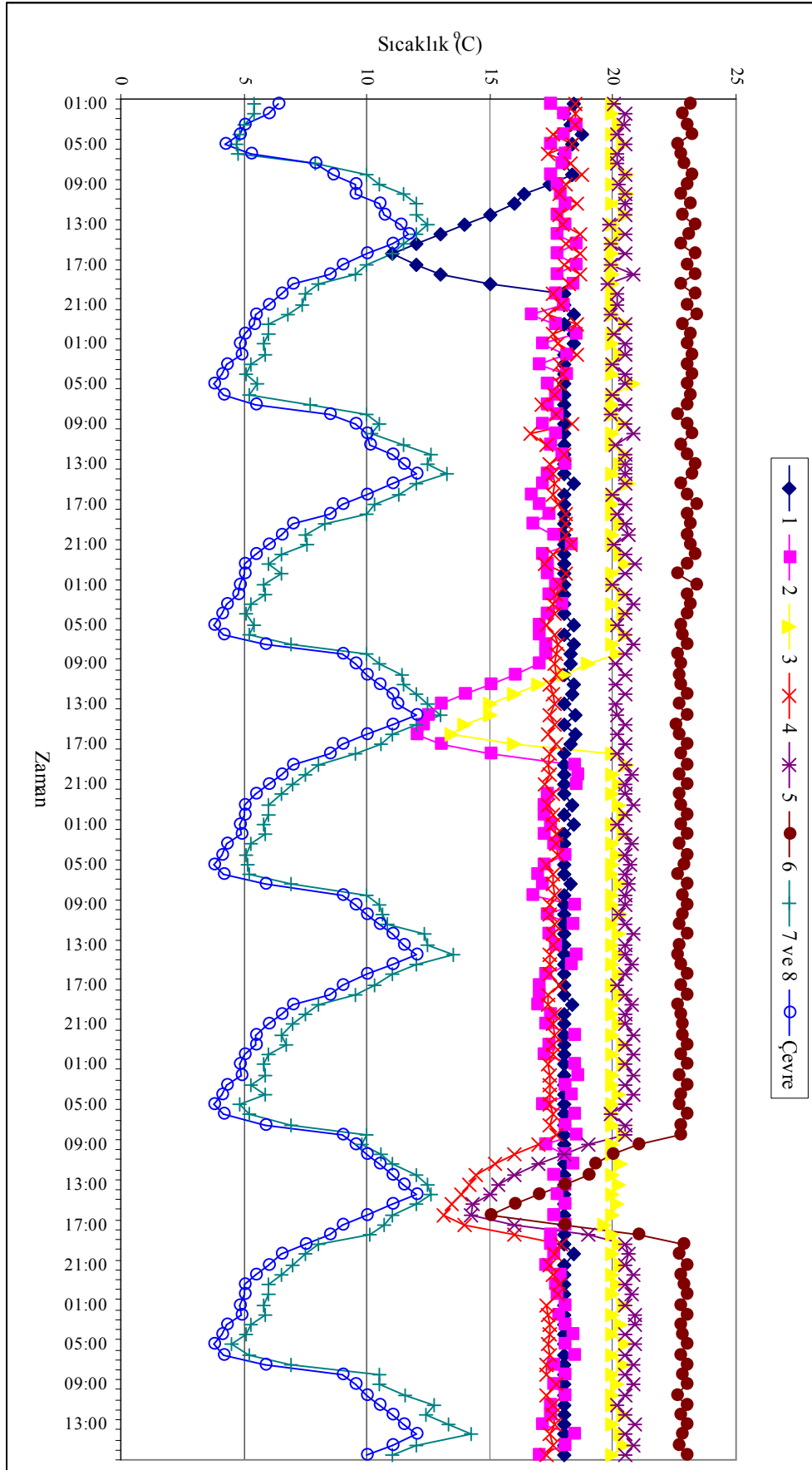


Şekil 5.19. Su-antifriz karışımı ile havanın giriş ve çıkışının şeması

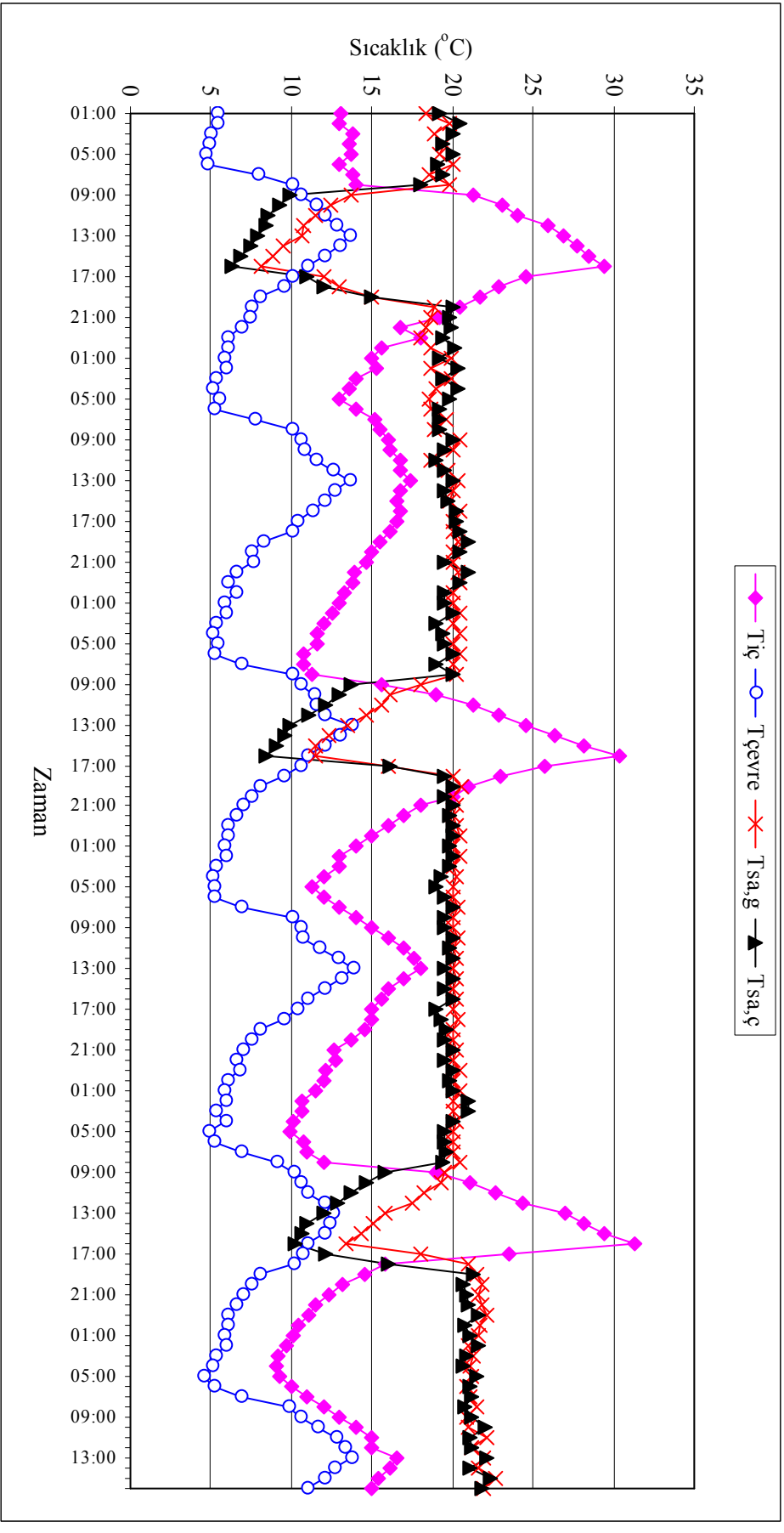
10.11.2006-15.11.2006 tarihleri arasında yapılan deneylerde, 30, 60 ve 90 m derinliğindeki toprak sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Şekil 5.20’de verilen numaralara uygun olarak derinliğe bağlı toprak sıcaklıklarının zamanla değişimleri Şekil 5.21’de verilmiştir. 30, 60 ve 90 m derinliğindeki TID sistemlerinin çalıştırılmasıyla elde edilen çevre, iç ortam ve su-antifriz karışımı sıcaklıklarının değişim değerleri aşağıda Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Sondaj kısmın şematik görünüşü



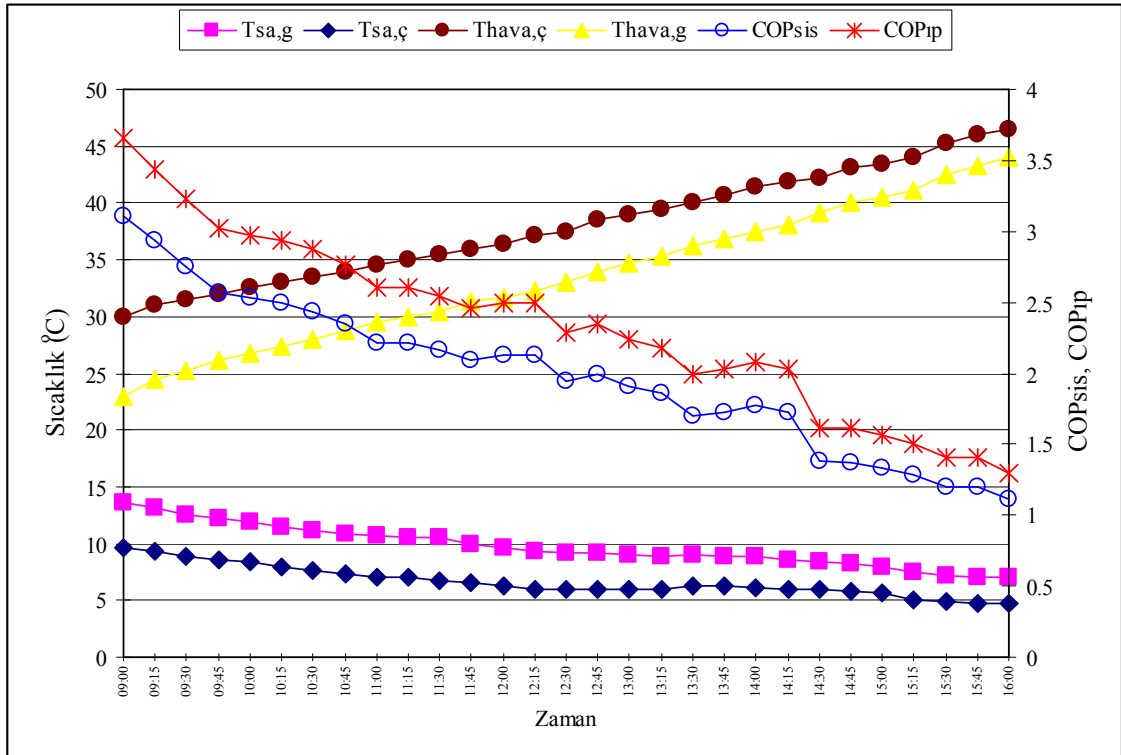
Şekil 5.21. Farklı derinlikteki toprak sıcaklıkları ile dış hava sıcaklığının zamanla değişimi (10.11.2006-15.11.2006)



Şekil 5.22. Çevre ve iç ortam sıcaklıkları ile su-antifriz sıcaklıklarının zamanla değişimi (10.11.2006-15.11.2006)

Yukarıdaki çalışmalar için oluşan performans eğrileri aşağıdaki grafiklerde (Şekil 5.23-Şekil 5.30) verilmiştir. Isıtma mevsiminin en soğuk günlerinde sistemin şebekeden çektiği ortalama güç, 1650 Watt (TB=% 4.35) iken, sadece kompresörün şebekeden çektiği ortalama güç 1450 Watt (TB=%4.35)'dır. Sirkülasyon pompasının gücü derinlik değiştikçe farklılık göstermekte olup, 30, 60 ve 90 m'lik sistemler için güçler, 40, 62 ve 83 Watt'dır. Aynı dönemlerde, buharlaştırıcı basıncı 350 kPa (TB=%2.72) iken, yoğuşturucu basıncı 1500 kPa (TB=%2.72)'dır.

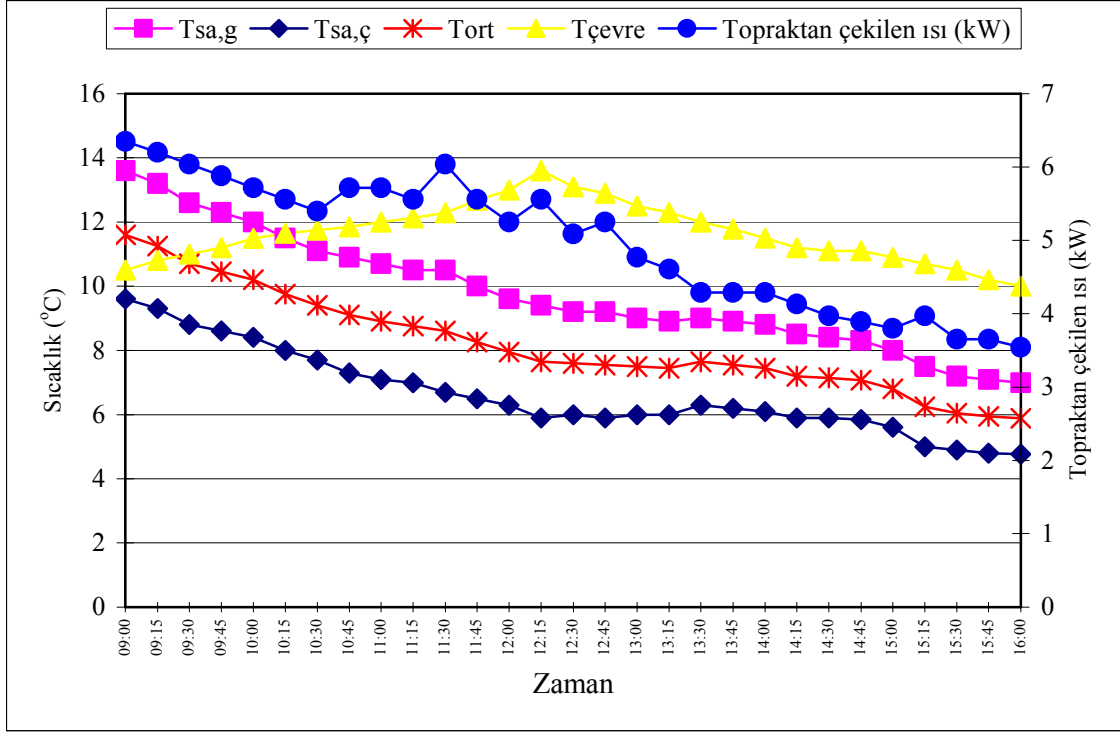
Şekil 5.23'de 30 m'lik sondaj kuyusu devrede iken ısıtma periyodunda $T_{sa,ç}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,ç}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifriz karışımı sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,ç}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 3.12 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde önemli bir parametre olan $T_{sa,g}$ sıcaklığı maksimum 13.6 °C'ye ulaşmıştır. Bu maksimum değerde en yüksek COP_{sis} ve COP_{ip} sırasıyla 3.11 ve 3.66 iken deney süresince bu değerlerin ortalaması sırasıyla 1.98 ve 2.33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.23. 30 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

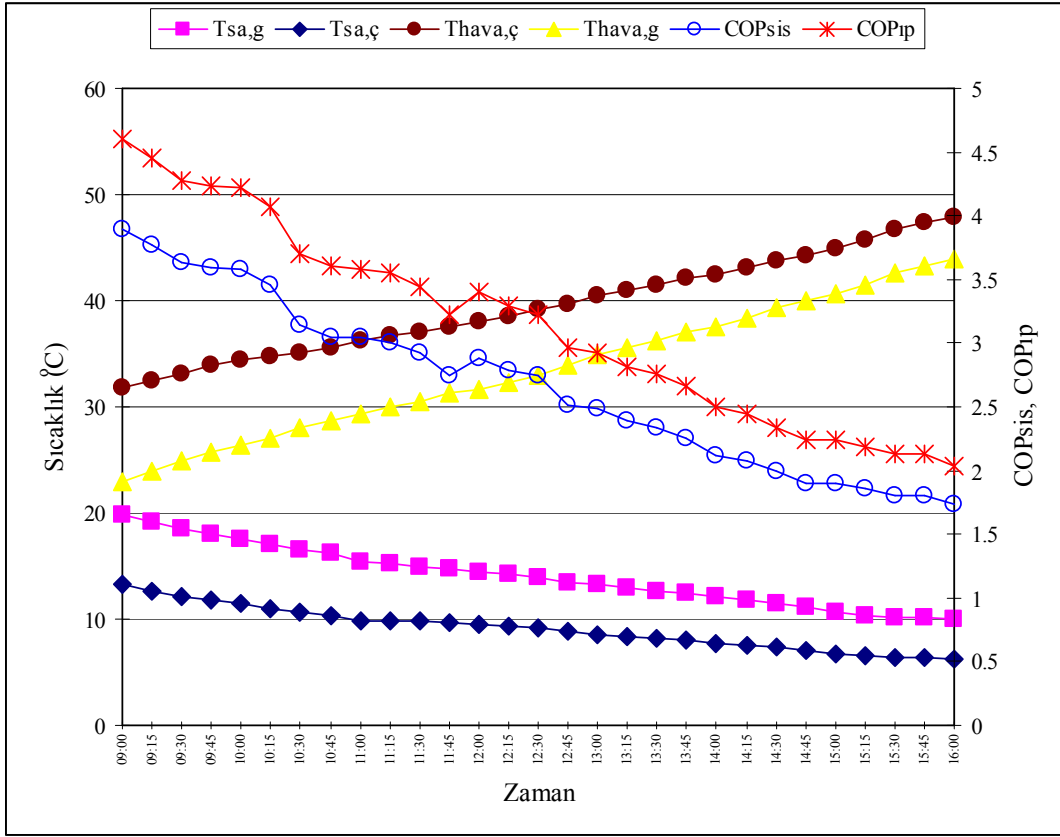
Sistemde dolaşan su-antifriz karışımının ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının topraktan çekilen ısı miktarı ile olan değişimi Şekil 5.24'de verilmiştir. Deney süresince

topraktan çekilen maksimum ısı miktarı 6.35 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 4.95 kW'dır.



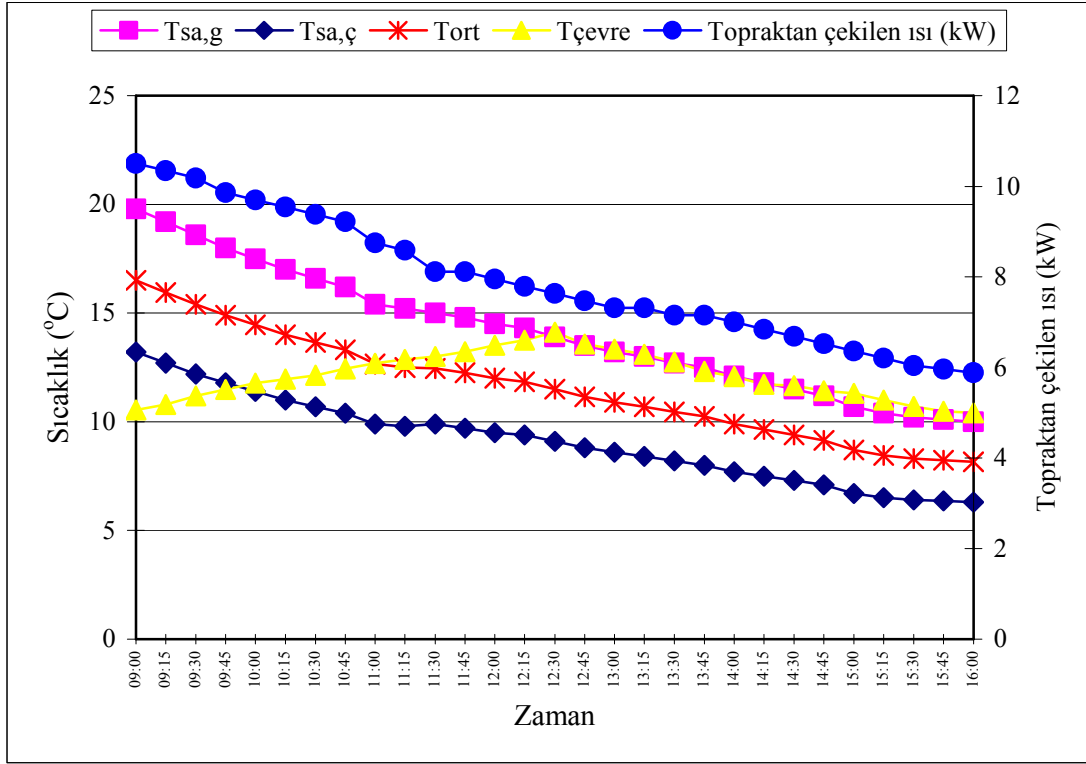
Şekil 5.24. 30 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi

Şekil 5.25'de 60 m'lik sondaj kuyusu devrede iken ısıtma periyodunda $T_{sa,ç}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,ç}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifriz karışımı sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,ç}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 4.98 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde önemli bir parametre olan $T_{sa,g}$ sıcaklığı maksimum 19.8 °C'ye ulaşmıştır. Bu maksimum değerde en yüksek COP_{sis} ve COP_{ip} sırasıyla 3.9 ve 4.6 iken, deney süresince bu değerlerin ortalaması, sırasıyla 2.66 ve 3.14 olarak hesaplanmıştır.



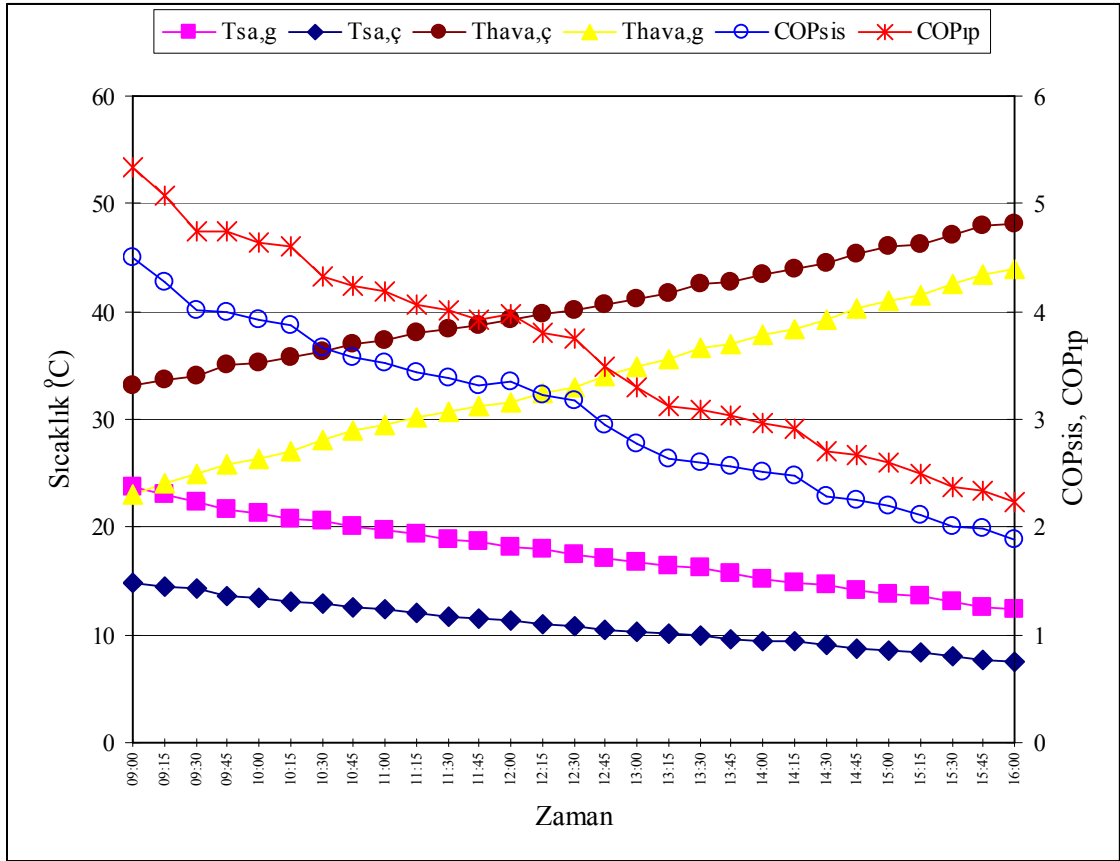
Şekil 5.25. 60 m’lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

TKIP sisteminde dolaşan su-antifriz karışımının ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının topraktan çekilen ısı miktarı ile olan değişimi Şekil 5.26’da verilmiştir. Deney süresince topraktan çekilen maksimum ısı miktarı 10.5 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 7.91 kW’dır.



Şekil 5.26. 60 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün zamanla değişimi

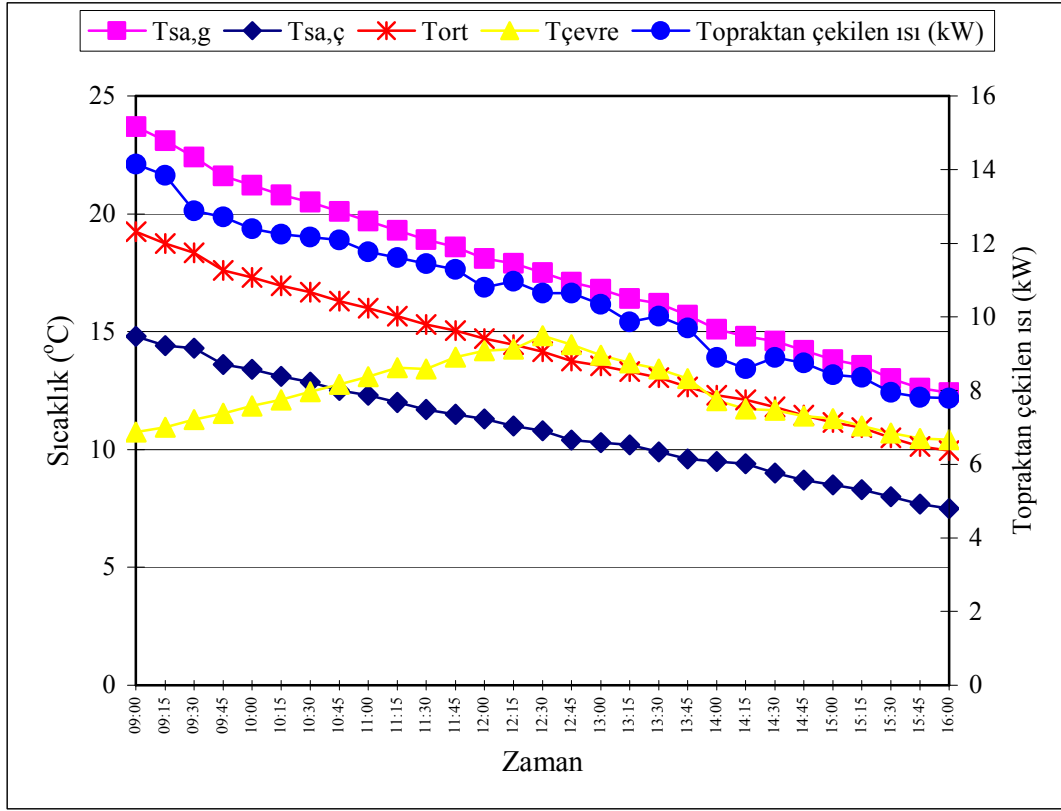
Şekil 5.27'de 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken ısıtma periyodunda $T_{sa,ç}$, $T_{sa,g}$, $T_{hava,ç}$ ve $T_{hava,g}$ sıcaklıkları ile COP_{ip} ve COP_{sis} değerlerinin değişimleri verilmiştir. Bir günlük deney boyunca toprakta dolaşan su antifiriz sıcaklıklarından toprağa gidiş sıcaklığı ($T_{sa,ç}$) ile topraktan dönüş sıcaklığı ($T_{sa,g}$) arasında ortalama 6.66 °C fark ortaya çıkmıştır. Bu tür sistemlerde daha çok önemli olan $T_{sa,g}$ sıcaklığı maksimum 23.7 °C'ye ulaşmıştır. Bu sıcaklıkta en yüksek COP_{sis} ve COP_{ip} sırasıyla 4.5 ve 5.33 olarak bulunmuştur. Deney süresince bu değerlerin ortalaması sırasıyla 3.05 ve 3.61 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.27. 90 m'lik sistem için çeşitli sıcaklıklarla COP değerlerinin zamanla değişimi

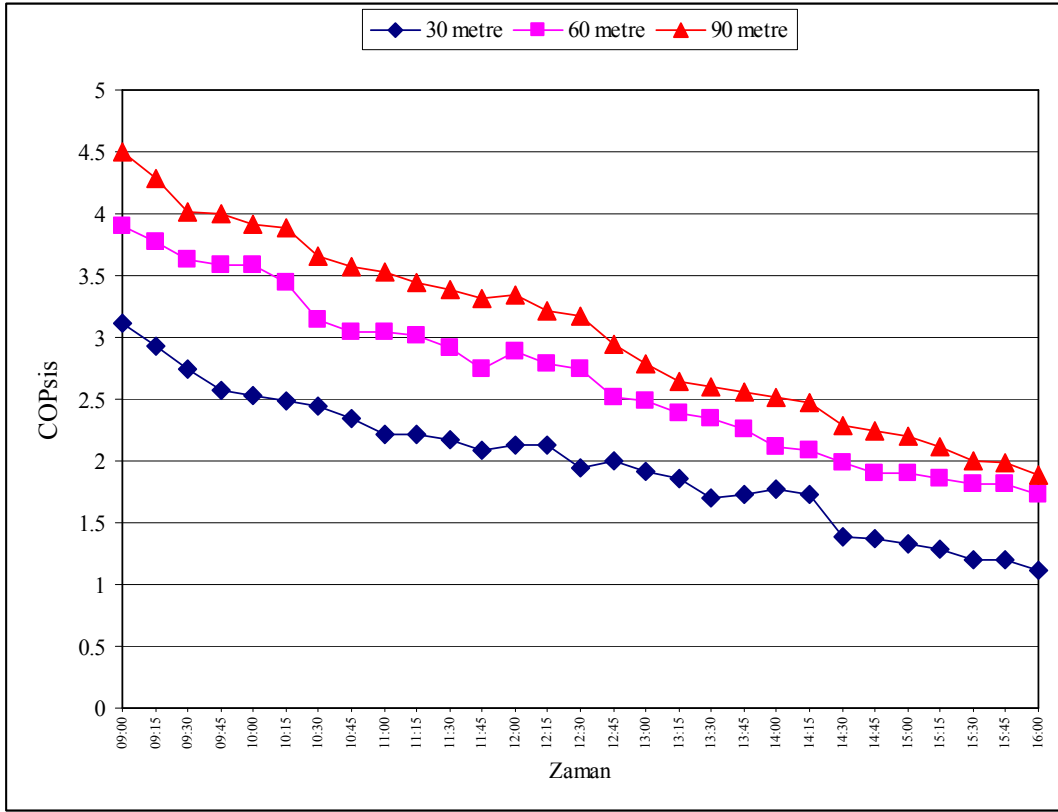
Sistemde dolaşan su-antifriz karışımının ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığının topraktan çekilen ısı miktarı ile olan değişimi Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Deney süresince topraktan çekilen maksimum ısı miktarı 14.15 kW değerinde iken, ortalama olarak bu değer 10.58 kW'dır.

Isıtma periyodunda, toplam boru boyuna göre topraktan çekilen ortalama ısı miktarı en yüksek 81.9 W/m iken en düşük değeri 45.6 W/m olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki bir çalışmada [31], tipik toprak şartları ve tekli U-tipli TID için birim boru boyundan çekilen ısı miktarı 50 W/m iken, başka bir çalışmada [50] bu değer 50-80 W/m olarak verilmiştir.



Şekil 5.28. 90 m'lik sondaj kuyusu için çeşitli sıcaklıklarla ısı yükünün değişimi

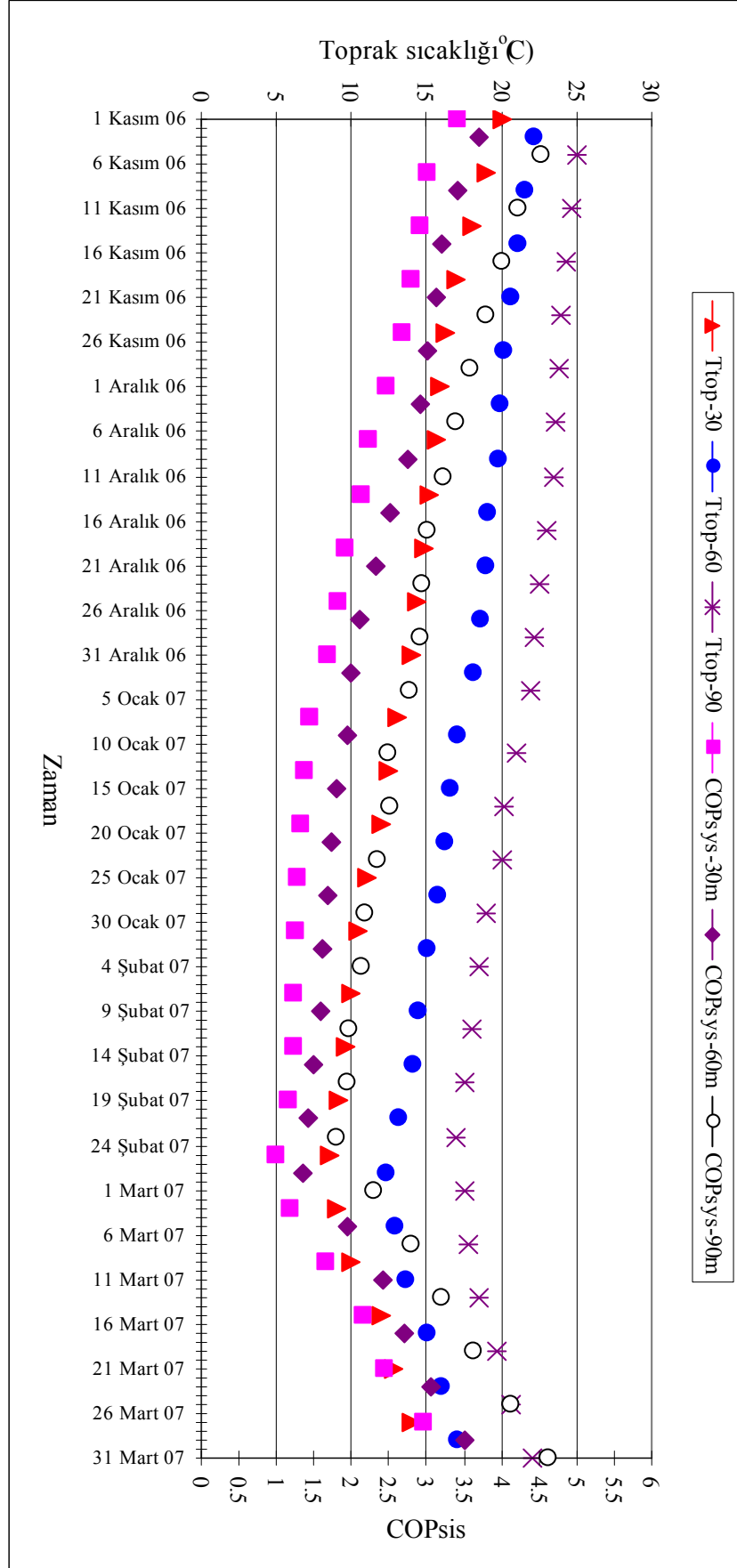
Isıtma periyodunda üç günlük deneylerden elde edilen COP_{sis} değişimleri üç farklı derinlikteki kuyu için aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Şekil 5.29'dan görüldüğü gibi kışın derinlik arttıkça daha sıcak bir ortamdan ısı çekildiği için ve bu sıcaklıktaki toprak da iç ortamdaki ısı pompası ünitesine daha uygun bir ısı kaynağı sağladığı için daha iyi sistem performansı elde edilmiştir. Üç gün boyunca saat 09:00 ile 16:00 arasında alınan ölçümlerde ortalama COP_{sis} değerleri 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için sırasıyla 1.98, 2.67 ve 3.05 olarak hesaplanmıştır. Ardışık üç günde deney yapıldığı için çevre ve toprak şartlarının yaklaşık aynı kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.29. Isıtma periyodunda farklı kuyularda COP_{sis} değerinin zamanla değişimi

2006–2007 yılı ısıtma döneminde 01 Kasım 2006 ile 31 Mart 2007 tarihleri arasında yapılan deneylerle TKIP sisteminin uzun süreli davranışı araştırılmıştır. 30, 60 ve 90 m derinlikteki toprak sıcaklıkları ile bu derinliklere ait sistemlerin çalıştırılması sonucu elde edilen COP_{sis} değişimleri Şekil 5.30’da verilmiştir. Görüldüğü gibi toprak sıcaklıkları Şubat ayının sonlarına doğru minimum değerlere gelerek COP_{sis} değerlerinin de düşmesine neden olmuştur. Ancak, deney süresinin daha sonraki dönemlerinde toprak sıcaklıkları yükseldiği için ısıtma performans katsayısı COP_{sis} ’nin değeri de artmaya başlamıştır. Deneyler süresince 30, 60 ve 90 m’lik kuyularda ölçülen ortalama toprak sıcaklıkları sırasıyla 13.35, 17.07 ve 21.02 °C iken bu değerlere karşın COP_{sis} değerleri de sırasıyla 1.93, 2.37 ve 3.03’dür.

ABD’de Su-Kaynaklı Isı Pompası Mühendislik Komitesi tarafından laboratuvar şartlarında bu tür sistemlerin performans analizi yapılmıştır. Air-Conditioning and Refrigeration Institute (ARI) standardına göre ısıtma modu için TKIP sisteminin minimum performansı 2.5, soğutma modu için ise minimum 2.9’dur. Ancak, komite 2001 yılındaki ASHRAE’nin 90.1 standardında bu değerleri ısıtma modu için 3.1 soğutma modu için ise 3.9 olarak alınmasını tavsiye etmiştir [42]. Bu uluslararası değerlerle, bizim deneysel çalışmadan elde ettiğimiz değerler karşılaştırıldığında ulusal imkânlarla kurduğumuz sistemimizin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 5.30. Isıtma periyodunda sistemin uzun süreli performansı

6. EKSERJİ ANALİZİ

6.1. Giriş

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin niceliği ile ilgilidir, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular. Bu yasa, hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve uygulamada mühendis için bir zorluk çıkarmaz. Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niteliği ile ilgilidir. Daha açık söylenirse; bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma olanağının değerlendirilememesi bu yasanın inceleme alanı içindedir. Mühendislik sistemlerinde enerjinin niteliğini öne çıkaran yönde iyileştirmeler yapılması, mühendisin bilgi ve becerisinin sınırlarını zorlayan bir konudur [100, 105].

Diğer enerji türlerine dönüşebilme özelliği enerjinin değer ölçüsü olarak alınırsa, çeşitli enerji türleri üç ayrı grupta toplanabilir [105]:

- a) Diğer enerji türlerine sınırsız veya tamamen dönüştürülebilen enerji (örneğin mekanik enerji, elektrik enerjisi, potansiyel enerji, kinetik enerji vb.),
- b) Diğer enerji türlerine sınırlı (kısmen) dönüştürülebilen enerji (örneğin iç enerji, ısı enerjisi vb.),
- c) Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi imkansız enerji (örneğin çevrenin iç enerjisi vb.).

6.1.1. Ekserjinin tanımı

Ekserji bir sistemde iş yapabilme yeteneğini ifade etmektedir. Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi olanak dışı olan enerjiye, kullanılamaz enerji, bağlı enerji ya da anergi adı verilmektedir. Dolayısıyla bütün enerji türleri için genel bir ifade aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (6.1)$$

Elektrik enerjisi ve mekanik enerji gibi enerji türlerinin anergi bölümü sıfıra eşittir. Aynı şekilde çevrenin iç enerjisinin tamamı anergi olduğu için çevre enerjisinin ekserjisi de sıfıra eşit olmaktadır.

Ekserji, mühendislik biliminde şu iki temel konuyu da kapsamaktadır. Bunlar çevre ve ekonomidir. Ekserji, eko-teknolojik bakımdan üç temel kavram kapsamında ele alınmaktadır: (I) minimum çevresel etki, maksimum enerji ve enerji kaynaklarının ideal koşullarda işletileceği teknolojiler, (II) çevreyi kirlletme potansiyelleri yüksek olan maddelerin çevresel davranışları, (III) çevresel değerlendirme, enerji ve toplum güvenliği. Yukarıdaki temel ekserji kavramlarına bakılarak ekserjinin termodinamik bir potansiyel olduğu, iş yapabilme ve kullanılabilir enerjinin bir ölçütü olduğu söylenebilir .

Ekserji, sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmayıp aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu analizde, enerji ve ekserji verimlilikleri arasındaki farkı anlamak önemlidir. Bu farkı anlamak, verilen bir amacı gerçekleştirmek ve enerji kaynaklarının (örneğin fosil yakıtlar) kullanımını verimli ve etkili bir şekilde sürdürmek için kullanılan enerjinin niceliğini ve niteliğini hesaba katmak için gereklidir. Ekserji, kullanılabilir enerji ve kullanılabilirlik kavramları benzerdirler. Ekserji kaybı, ekserji tüketimi, tersinmezlik ve kayıp iş terimleri de kendi aralarında benzerdirler. Bu terminoloji henüz açık bir standarda kavuşturulamamıştır [106].

Bir sonlu zaman aralığı boyunca herhangi bir sistem içerisindeki kararsız akış işlemleri için enerji ve ekserji dengeleri şöyle yazılabilir:

$$\text{Giren enerji} - \text{Çıkan enerji} = \text{Toplam enerji} \quad (6.2)$$

$$\text{Giren ekserji} - \text{Çıkan ekserji} - \text{Ekserji tüketimi} = \text{Toplam ekserji} \quad (6.3)$$

Eşitlik (6.2) ve (6.3)'de verilen kazançlar, shaft işi veya elektrik kullanımından, ısı transferinden, ısı ve işin birleşmesinden dolayı açığa çıkan enerjiden veya kısmi bir buhar akışından dolayı meydana gelirler. Kayıplar için ise, ısı ve hafif gazların kullanılmadan çevreye aktarımı örnek olarak verilebilir. Ekserji eşitliğindeki kayıp terimi, iç tersinmezliklerden ortaya çıkar [107].

Enerji (birinci yasa) ve ekserji (ikinci yasa) verimleri ε_1 ve ε_2 , % olarak sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon_1 = (\text{Giren enerji} / \text{Toplam giren enerji}) \times 100 \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_2 = (\text{Giren ekserji} / \text{Toplam giren ekserji}) \times 100 \quad (6.5)$$

Daha önceleri ısı makineleri, soğutma makineleri, ısı pompaları gibi makinelerin çalışma etkinliklerinin bir ölçüsü olarak ısı verim ve etkinlik katsayısı tanımları yapılırdı, bu tanımlar, sadece birinci yasa göz önüne alınarak yapıldığında, birinci yasa verimi olarak da bilinirlerdi. Birinci yasa verimi veya bazen adlandırıldığı gibi dönüşüm verimi, olabilecek en iyi ölçü olarak alınmaz. Bu nedenle bazen yanlış değerlendirmelere yol açabilir. Bu yetersizliği gidermek için ikinci yasa verimi tanımlanmaktadır. İkinci yasa verimi, gerçek ısı verimin, aynı koşullarda olabilecek en yüksek (tersinir) ısı verime oranıdır. Bu tanım, daha geneldir, çünkü çevrimlerin dışında türbin, piston-silindir ve benzeri sistemlerdeki hal değişimlerine de uygulanabilir. İkinci yasa veriminin % 100'den daha büyük olamayacağı not edilmelidir. İkinci yasa verimi, kompresörler ve soğutma makineleri gibi iş gerektiren makineler için de tanımlanabilir. Bu durumda ikinci yasa verimi, gerekli en az işin, tüketilen gerçek işe oranı olur.

Fakat üzerinde görüş birliği sağlanmış genel bir ikinci yasa verimi tanımı yoktur. Literatürde aynı sistem için farklı ikinci yasa verimi tanımlarına rastlanabilir. İkinci yasa verimini tanımlamaktaki amaç, tersinir hal değişimlerine hangi ölçüde yaklaşıldığını belirtmektir. Bu bakımdan ikinci yasa veriminin değeri en kötü durumda sıfır, en iyi durumda bir olacaktır [100].

6.1.2. Ekserji çeşitleri

Bir sistemin toplam ekserjisi $\dot{E}x$, dört bileşenden meydana gelir, bunlar (I) fiziksel ekserji $\dot{E}x_{FI}$, (II) kinetik ekserji $\dot{E}x_{KI}$, (III) potansiyel ekserji $\dot{E}x_{PO}$ ve (IV) kimyasal ekserji $\dot{E}x_{KM}$ 'dir.

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{FI} + \dot{E}x_{KI} + \dot{E}x_{PO} + \dot{E}x_{KM} \quad (6.6)$$

Ekserji, geniş bir kullanıma veya özelliğe sahip olmasına rağmen sık sık kütle veya molar bazda yazılabilir. Kütle bazında toplam özgül ekserji aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{e}x = \dot{e}x_{FI} + \dot{e}x_{KI} + \dot{e}x_{PO} + \dot{e}x_{KM} \quad (6.7)$$

Potansiyel ve kinetik ekserjilerinin ihmal edilmesi yanında kimyasal bileşeni içinde değişiklik olmaksızın bir kütle akışındaki özgül ekserji,

$$\dot{e}x_{FI} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (6.8)$$

olmakta ve burada, h ve s sırasıyla özgül entalpi ve entropi, T sıcaklık, o indisi ise çevre şartlarını göstermektedir.

Fiziksel ekserji, sistemin sıcaklığı T ve basıncı P ilk durumundan T_o , P_o halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Fiziksel ekserji, aşağıda gösterildiği gibi iki bileşenden oluşmaktadır.

$$\dot{E}X^{FI} = \dot{E}X_{\Delta T}^{FI} + \dot{E}X_{\Delta P}^{FI} \quad (6.9)$$

Sistemlerin ısı ekserjisi, Eşitlik 6.10'da verildiği şekliyle hesaplanır.

$$\dot{E}X_{ISI} = \dot{E}X_{FI} + \dot{E}X_{KM} \quad (6.10)$$

Herhangi bir süreçteki iş ekserjisi, maksimum iş potansiyeli olduğundan, bütün süreçlerde iş, ekserjiye eşittir.

$$\dot{E}X_{i\dot{s}} = \dot{W} \quad (6.11)$$

Isı transferinden dolayı meydana gelen ekserji,

$$\dot{E}X_{ISI} = \int_A \left(\frac{T - T_o}{T} \right) \dot{Q} dA \quad (6.12)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Eğer bir sistemde üniform sıcaklık dağılımı varsa ısı transferinden dolayı oluşan ekserji;

$$\dot{E}x_{is1} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (6.13)$$

şeklinde hesaplanır.

6.1.3. Ekserji kaybı

Bir sistemin ekserji kaybı veya tersinmezliği, Eşitlik 6.14'den hesaplanmaktadır. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi ekserji kaybı net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına eşittir:

$$\dot{E}x_k = \dot{I} = T_0 \dot{S}_{net} \quad (6.14)$$

Eşitlik 6.14 ifadesine Ekserji Kaybı Yasası veya Gouy-Stodola Yasası denir [108]. Ayrıca, Eşitlik 6.15'de ifade edildiği gibi ekserji kaybı, tersinmezliklerden dolayı ortaya çıkan kayıp işe de eşittir:

$$\dot{E}x_k = \dot{I} = \dot{W}_k \quad (6.15)$$

Isıl sistemlerin tasarımında ekserji kaybı hesabı ve ekserji analizi, literatürde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bir ısı sistemine gerçek performansı, ekserji kaybı ve sistemden elde edilecek maksimum kullanılabilir iş hesaplanarak bulunabilir. Bundan dolayı tüm mühendislik sistemlerinin ekserji analizi yöntemi kullanılarak analiz edilmesi gerekir. Bu amaçla, TKIP sistemimizin enerji ve ekserji analizi, detaylı şekilde aşağıdaki bölümde verilmektedir.

6.1.4. TKIP sisteminin ekserji analizi

Bu bölümde, daha önceki bölümde verilen deneysel verilerden faydalanarak TKIP sisteminin soğutma ve ısıtma moduna göre ekserji analizi yapılacaktır. Ekserji analizi yapıldıktan sonra sonuçlar tablolar halinde verilerek enerji analizi ile de kıyaslama yapılacaktır. TKIP sisteminin tasarımında, gerekli olan tüm işlemler bazı araştırmacıların çalışmaları ve önerileri doğrultusunda yapılmıştır [109].

Ekserji analizinin teorisi, yukarıda detaylı olarak verilmiştir. Bu bölümde, “termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizi” için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- a) Tüm işlemlerde kararlı akış hali söz konusudur ve kararlı akış ile birlikte potansiyel ve kinetik enerji etkileri, kimyasal ve nükleer reaksiyonlar ihmal edilmiştir,
- b) Sisteme olan ısı transferinin yönü ve sistemden olan iş transferinin yönü pozitifdir,
- c) Bakır bağlantı borularının uzunluğunun kısa oluşundan dolayı bu borular içerisindeki ısı transferi ve soğutucu akışkanın basınç düşüşü ihmal edilmiştir,
- d) Kompresörün adyabatik verimi %80 kabul edilmiştir,
- e) Kompresörün mekanik ve kompresör motorunun elektriksel verimleri sırasıyla %70 ve 72’dir. Bu değerler, kompresöre giren güçten veya kompresörün şebekeden çektiği güçten elde edilen veriler kullanılarak tahmin edilmiştir,
- f) Hava, sabit özgül ısı, ideal gaz ve nem içeriği ihmal edilebilir bir akışkan olarak alınmıştır,
- g) Yoğusturucu fanının ve sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güçler, kompresörün şebekeden çektiği güce göre küçük olduğundan ihmal edilmiştir,
- h) Soğutucu akışkanın ölü şartlarındaki sıcaklığı ve basıncı, $T_0 = 290 \text{ K}$ ve $P_0 = 1.013 \text{ bar}$ ’a eşit olarak alınmıştır [111].

Yukarıdaki kabuller ışığında, kayıp işi, ısı girişini, tersinmezlik miktarını, enerji ve ekserji verimliliklerini, korunum eşitliklerini kullanarak bulabiliriz [100, 108, 112, 113].

Kütlenin korunumu denklemi,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (6.16)$$

burada; $\dot{m}$, kütleli debiyi, alt indisler ise giriş ve çıkışı göstermektedir. Genel enerji korunumu denklemi, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\varphi \quad (6.17)$$

Burada; $\dot{E}_g$, ısı, iş ve kütle yoluyla olan sisteme giren net enerji transferi miktarı, $\dot{E}_\varphi$ ise ısı, iş ve kütle yoluyla sistemden çıkan net enerji transferi miktarıdır.

Genel enerji korunumu denklemi daha açık bir şekilde,

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W} + \sum \dot{m}_\phi h_\phi \quad (6.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{net},g} = (\dot{Q}_g - \dot{Q}_\phi)$ net ısı girişinin miktarı, $\dot{W} = \dot{W}_{\text{net},\phi} = (\dot{W}_\phi - \dot{W}_g)$ net iş çıkışının miktarı ve h, birim kütle başına entalpi değeridir.

Genel ekserji korunumu eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_\phi = \dot{E}x_k \quad (6.19a)$$

Burada, $(\dot{E}x_g - \dot{E}x_\phi)$ ısı, iş ve kütle yoluyla olan net ekserji transferi miktarı, $\dot{E}x_k$, ekserji kaybı miktarı olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}x_{\text{ısı}} - \dot{E}x_{\text{iş}} + \dot{E}x_{\text{kütle},g} - \dot{E}x_{\text{kütle},\phi} = \dot{E}x_k \quad (6.19b)$$

Eşitlik 6.19b kullanılarak genel ekserji korunumu;

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_{\text{kay}}}) \dot{Q}_{\text{kay}} - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\phi \psi_\phi - \dot{E}x_k \quad (6.20)$$

haline dönüşür, ψ değeri,

$$\psi = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (6.21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $\dot{Q}_k$, kaynak bölgesinde T_{kay} sıcaklığında sınır boyunca olan ısı transferini, $\dot{W}$ iş miktarını, ψ akış ekserjisini, h entalpiyi, s entropiyi ve sıfır alt indisi P_o , T_o durumundaki ölü şartları göstermektedir.

Entropi dengesinin hali aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\dot{S}_g - \dot{S}_\phi + \dot{S}_ü = 0 \quad (6.22)$$

Burada, $(\dot{S}_g - \dot{S}_\phi)$, ısı ve kütle yoluyla olan net entropi transferinin miktarını, $\dot{S}_u$, üretilen entropi miktarını gösterir. Isı ve kütle yoluyla olan entropi transfer miktarı sırasıyla $\dot{S}_{isi} = \frac{\dot{Q}_{kay}}{T_{kay}}$ ve $\dot{S}_{küttele} = \dot{m}s$ 'dir.

Sisteme olan ısı transferinin pozitif yönü hesaba katılırsa, eşitlik 6.22'deki genel entropi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{S}_u = \sum \dot{m}_\phi s_\phi - \sum \dot{m}_g s_g - \sum \frac{\dot{Q}_{kay}}{T_{kay}} \quad (6.23)$$

Genellikle, ilk olarak $\dot{S}_u$ 'yi, daha sonra aşağıdaki eşitlikten elde edilen ekserji kaybı veya tersinmezlik miktarı $\dot{E}x_k(I)$ 'yi bulmak daha uygundur.

$$\dot{I} = \dot{E}x_k = T_o \dot{S}_u \quad (6.24)$$

Literatürde, ekserji verim eşitlikleri için çok çeşitli ifadeler mevcuttur [101]. Bunlar arasında olan ve daha çok kullanılan oransal verim veya ortalama oransal verim tarifi, Kotas tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [108]:

$$\eta_{O,V} = \frac{\dot{E}x_{kazanilan,\phi}}{\dot{E}x_{kullanilan}} \quad (6.25)$$

Burada, $\dot{E}x_{kazanilan,\phi}$, sistemden transfer olan tüm ekserjinin toplamıdır, bu değer pozitifdir. $\dot{E}x_{kullanilan}$ ise herhangi bir işlem için gerekli olan ekserji giriş miktarıdır.

Eşitlik 6.25'i ısı pompası sistemleri için yazarsak,

$$\eta_{O,V,IP} = \frac{\dot{E}x_{isi}}{\dot{W}_{gercek,g}} \quad (6.26)$$

elde ederiz. Burada, her terim pozitif olup $\dot{E}x_{isi}$ birim zamanda sisteme ısı yoluyla giren ekserji transferi, $\dot{W}_{gercek,g}$ ise birim zamanda sisteme giren gerçek iş miktarıdır.

Isı yoluyla olan ekserji transfer miktarı:

$$\dot{E}x_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{g,hava}}\right) \dot{Q}_{iy} \quad (6.27)$$

şeklindedir. Burada, $T_{g,hava}$ iç hava (ortam) sıcaklığı ve $\dot{Q}_{iy}$ odanın ısıtma yüküdür ve bu değer yoğuşturucudan transfer olan ısı miktarına eşit kabul edilmektedir.

İkinci kanun verimi ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir [112].

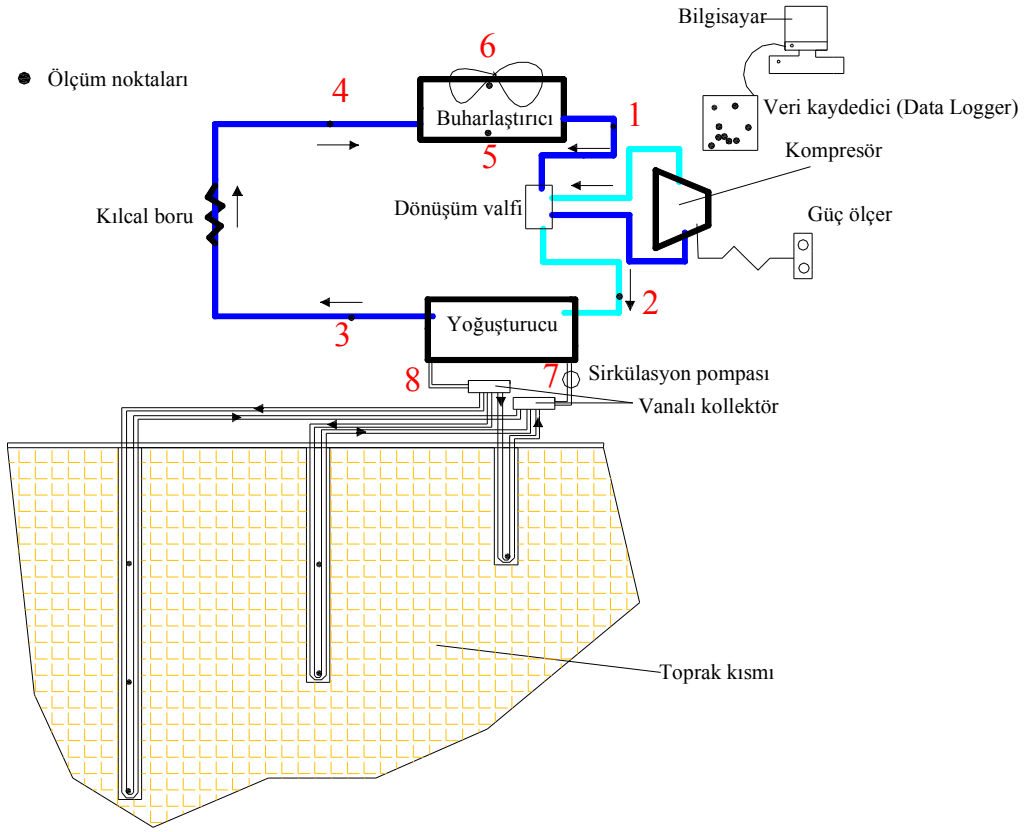
$$\eta_{II} = \frac{COP_{C,1}}{COP_{gerçek,1}} \quad (6.28)$$

TKIP sisteminin ısıtma performansı, yoğuşturucudan transfer olan ekserji miktarının gerçek iş miktarına oranı olarak da tarif edilebilir [108]:

$$\eta_{P,TKIP} = \frac{\dot{E}_{g,yoğ} - \dot{E}_{ç,yoğ}}{\dot{W}_{gerçek,g}} \quad (6.29)$$

6.1.4.1. Soğutma periyodu için ekserji analizi

(6.16)-(6.29) eşitlikleri kullanılarak TKIP sisteminin bileşenleri için korunum eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler, kompresör, yoğuşturucu, kılcal boru, buharlaştırıcı, buharlaştırıcı fanı ve TID bileşenleri için soğutma modunda türetilmiştir. Soğutma periyodunda sistem üzerinde ölçüm alınan noktalar, Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Soğutma periyodu için sistem üzerindeki ölçüm noktaları

Kompresör:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{soğ} , \quad (6.30a)$$

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{soğ} (h_{2gerçek} - h_1) , \quad (6.30b)$$

$$\dot{E}x_{k,komp,e} = T_0 \dot{m}_{soğ} (s_1 - s_{2gerçek}) , \quad (6.30c)$$

$$\dot{E}x_{k,komp} = \dot{m}_{soğ} (\psi_1 - \psi_{2gerçek}) + \dot{W}_{komp} . \quad (6.30d)$$

Bu eşitliklerde çevreye olan ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Yoğuşturucu:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{soğ} ; \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{sa} , \quad (6.31a)$$

$$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{yoğ} (h_2 - h_3) ; \dot{Q}_{yoğ} = \dot{Q}_{TID} , \quad (6.31b)$$

$$\dot{E}x_{k,yoğ,e} = T_0 [\dot{m}_{soğ} (s_2 - s_3) + \dot{m}_{sa} (s_7 - s_8)] , \quad (6.31c)$$

$$\dot{E}x_{k,yo\ddot{g}} = \dot{m}_{so\ddot{g}}(\psi_{2ger\check{c}ek} - \psi_3) + \dot{m}_{sa}(\psi_8 - \psi_7) . \quad (6.31d)$$

Kılcal boru:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{so\ddot{g}} , \quad (6.32a)$$

$$h_3 = h_4 , \quad (6.32b)$$

$$\dot{E}x_{k,kb,e} = T_0 \dot{m}_{so\ddot{g}}(s_4 - s_3) , \quad (6.32c)$$

$$\dot{E}x_{k,kb} = \dot{m}_{so\ddot{g}}(\psi_3 - \psi_4) . \quad (6.32d)$$

Buharlaştırıcı:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{so\ddot{g}} , \quad (6.33a)$$

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{so\ddot{g}}(h_1 - h_4); \dot{Q}_{buh} = \dot{Q}_{bf} , \quad (6.33b)$$

$$\dot{E}x_{k,buh,e} = T_0[\dot{m}_{so\ddot{g}}(s_1 - s_4) + \dot{m}_{hava}(s_5 - s_6)] , \quad (6.33c)$$

$$\dot{E}x_{k,buh} = \dot{m}_{so\ddot{g}}(\psi_4 - \psi_1) + \dot{m}_{hava}(\psi_6 - \psi_5) . \quad (6.33d)$$

Buharlaştırıcı fanı (bf):

$$\dot{m}_{hava,g} = \dot{m}_{hava,\zeta} = \dot{m}_{hava} , \quad (6.34a)$$

$$\dot{Q}_{bf} = \dot{m}_{hava} C_{p,hava} (T_{hava,\zeta} - T_{hava,g}); \dot{Q}_{bf} = \dot{Q}_{buh}; \dot{Q}_{syükü} = \dot{Q}_{buh} , \quad (6.34b)$$

$$\dot{E}x_{k,buh,e} = T_0 \left[\dot{m}_{hava}(s_6 - s_5) + \frac{\dot{Q}_{bf}}{T_{i\check{c},hava}} \right] , \quad (6.34c)$$

$$\dot{E}x_{k,bf} = \dot{m}_{hava}(\psi_5 - \psi_6) - \dot{Q}_{bf} \left(1 - \frac{T_0}{T_{i\check{c},hava}} \right) . \quad (6.34d)$$

Toprak ısı değiştiricileri (TİD, U-borusu çevrimi):

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{sa} , \quad (6.35a)$$

$$\dot{Q}_{TID} = \dot{m}_{sa} C_{p,sa} (T_8 - T_7), \quad (6.35b)$$

$$\dot{E}x_{k,TID,e} = T_0 \left[\dot{m}_{sa} (s_8 - s_7) - \frac{\dot{Q}_{TID}}{T_{toprak}} \right], \quad (6.35c)$$

$$\dot{E}x_{k,TID} = \dot{m}_{sa} (\psi_7 - \psi_8) + \dot{Q}_{TID} \left(1 - \frac{T_0}{T_{toprak}} \right). \quad (6.35d)$$

Soğutma periyodu için yapılan ekserji analizinde elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Tablo 6.1; 30 metrelik sistem için ölçülen sıcaklıklara bağlı olarak seçilen fiziksel özellikleri ile hesaplanan ekserji değerlerini göstermektedir. R-22 için bütün fiziksel özellikler Solkane hazır programından alınmıştır ve bu program sayesinde çevrimin herhangi bir noktasındaki ekserji miktarları da bulunmuştur [111]. Solkane programından alınan R-22 gazının fiziksel özellikleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Programın ekran görüntüsü, buharlaştırıcı sıcaklığının -10 °C, yoğuşturucu sıcaklığının 45 °C olduğu hal için Şekil 6.3’de verilmiştir. Şekil 6.4’de, çevrimdeki sıcaklık değerlerine göre hesaplanan ekserji değerleri gösterilmektedir. Hava ve su-antifriz karışımının fiziksel özellikleri de çeşitli kitaplardaki tablolardan faydalanarak bulunmuştur [114]. Bulunan tüm özelliklerden sonra yukarıda verilen eşitliklerden yararlanarak ekserji hesaplamaları yapılmış ve çıkan sonuçlar Tablo 6.1-6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Soğutma modunda 30 m’lik kuyu devredeyken belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	-10	3.55	401.14	1.7656	0.034	34.647	1.177
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	45/84.96	17.21	415.73	1.6881	0.034	71.704	2.43
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	30	11.88	236.5	1.1248	0.034	55.908	1.900
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	8	6.40	198.706	1.034	0.034	55.190	1.876
Buharlaştırıcı fanına giriş (5)	Hava	Gaz	22	1.013	64.66	0.2298	0.73	0.048	0.035
Buharlaştırıcı fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	16	1.013	44.963	0.1624	0.73	0.099	0.072
Toprak ısı değiştirgisinden su-antifiriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	34.94	5.6	146.5	0.5	0.43	2.94	1.26
Toprak ısı değiştirgisine su-antifiriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	38.42	6.6	159.21	0.5458	0.43	2.23	0.958

Physical properties – Solkane® 22

See also

Chemical Formula	[-]	CHClF2
Molecular weight	[-]	86.5
Boiling point at 1.013 bar	[°C]	-40.8
Critical temperature	[°C]	96.2
Critical pressure	[bar]	49.9
Viscosity of saturated liquid 2	[mPas]	0.247
Viscosity of saturated liquid 1	[mPas]	0.160
Viscosity of saturated vapor 1	[mPas]	0.0130
Thermal conductivity of saturated liquid 2	[W/(mK)]	0.103
Thermal conductivity of saturated liquid 1	[W/(mK)]	0.086
Thermal conductivity of saturated vapor 1	[W/(mK)]	0.0110
Spec. heat capacity of saturated liquid cp 1	[kJ/(kgK)]	1.227
Spec. heat capacity of saturated vapor cp 1	[kJ/(kgK)]	0.779
Ratio cp/cv (saturated vapor) 1	[-]	1.39
Density of saturated liquid 1	[kg/m³]	1195
Density of saturated vapor 1	[kg/m³]	44.11
Enthalpy of evaporation 1	[kJ/kg]	182.0
Explosion limits in air 3	[% by vol]	none

Legend:

- 1: t = 25°C
- 2: t = -15°C
- 3: t = 25°C; p = 1.013 bar

Şekil 6.2. R-22 gazının fiziksel özellikleri

Solkane - [SOLKANE® 22]

File Refrigerants Calculation Options Windows Help

R22 R23 R32 R123 R125 R134a R143a R152a R227 R404A R407C R409A R410A R507 R11 R12 R502 R13B1 ?

Solkane® 22

t_c °C 96.18
 t_b bar 49.90
 v_c dm³/kg 1.949

Evaporator

Temperature °C -10.00
 Superheating K 0.00
 Pressure drop bar 0.00
 Refrigerating cap. kW 5.000

Condenser

Temperature °C 45.00
 Subcooling K 0.00
 Pressure drop bar 0.00

Compressor

Isentr. efficiency 0.80

Suction line

Superheat K 0.00
 Pressure loss bar 0.00

Discharge line

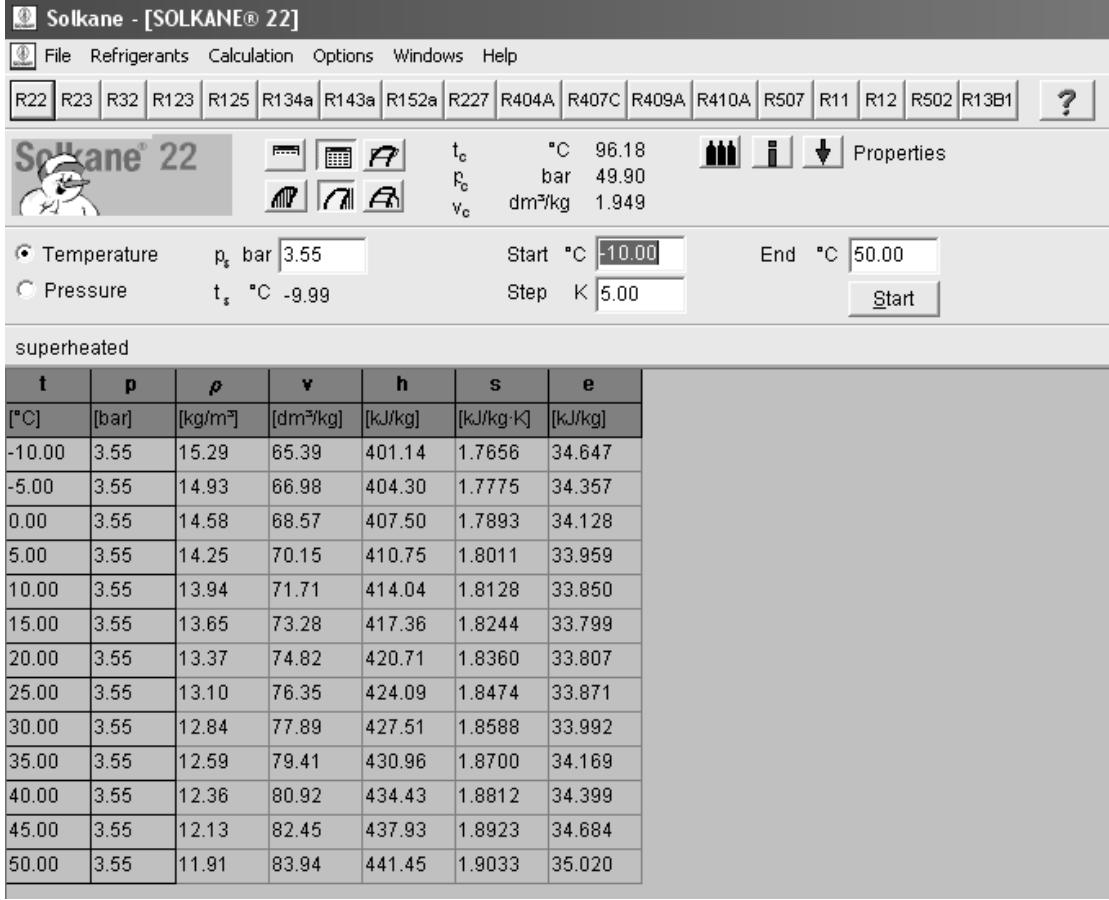
Temperature loss K 0.00
 Pressure loss bar 0.00

Calculation

Point	p [bar]	t [°C]	v [dm³/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	x
1	3.55	-10.00	65.43	401.14	1.7656	
2s	17.21	73.45	16.05	441.47	1.7656	
2	17.21	84.96	17.02	451.55	1.7942	
3	17.21	84.96	17.02	451.55	1.7942	
3''	17.21	45.00	13.32	415.73	1.6881	
3''4'm	17.21	45.00	N.N.	335.55	1.4361	
4'	17.21	45.00	0.90	255.38	1.1841	
4	17.21	45.00	0.90	255.38	1.1841	
5	3.55	-10.00	21.17	255.38	1.2117	0.316
56''m	3.55	-10.00	N.N.	328.26	1.4887	
6''	3.55	-10.00	65.43	401.14	1.7656	
6	3.55	-10.00	65.43	401.14	1.7656	

Single-stage process

Şekil 6.3. 30 m'lik kuyu durumu için programın ekran görüntüsü



Şekil 6.4. Ekserji hesabı ekran görüntüsü

30 m'lik kuyu için yapılan tüm hesaplamalar 60 m ve 90 m'lik kuyular için de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda belirtilmiştir. Soğutma periyodunda yapılan deneylerde elde edilen sıcaklıklara göre bulunan fiziksel özellikler 60 m'lik kuyu için Tablo 6.2'de verilmiştir. Tablo 6.2'deki değerlerden faydalanarak yukarıdaki eşitlikler yardımıyla ekserji hesaplamaları yapılmıştır. Yine aynı şekilde, 90 m'lik kuyu için elde edilen sıcaklık verilerinden faydalanılarak ekserji hesaplanmıştır (Tablo 6.3). Tüm hesaplamalarda, çevre sıcaklığı 290 K, toprak sıcaklığı 289 K ve iç ortam sıcaklığı 290 K olarak alınmıştır.

Tablo 6.2. Soğutma modunda 60 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	-11	3.42	400.75	1.7674	0.034	33.731	1.146
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	43/82.85	17.83	450.72	1.7958	0.034	72.453	2.463
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	29	11.57	235.27	1.1208	0.034	55.75	1.895
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	7	6.21	208.43	1.0301	0.034	55.214	1.877
Buharlaştırıcı fanına giriş (5)	Hava	Gaz	20.83	1.013	61.05	0.210	0.73	2.24	1.6352
Buharlaştırıcı fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	14.33	1.013	41.01	0.1435	0.73	1.684	1.22
Toprak ısı değiştirgisinden su-antifriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	29.44	4.01	121.61	0.417	0.43	2.38	1.023
Toprak ısı değiştirgisine su-antifriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	34.19	5.3	143.75	0.4961	0.43	1.33	0.572

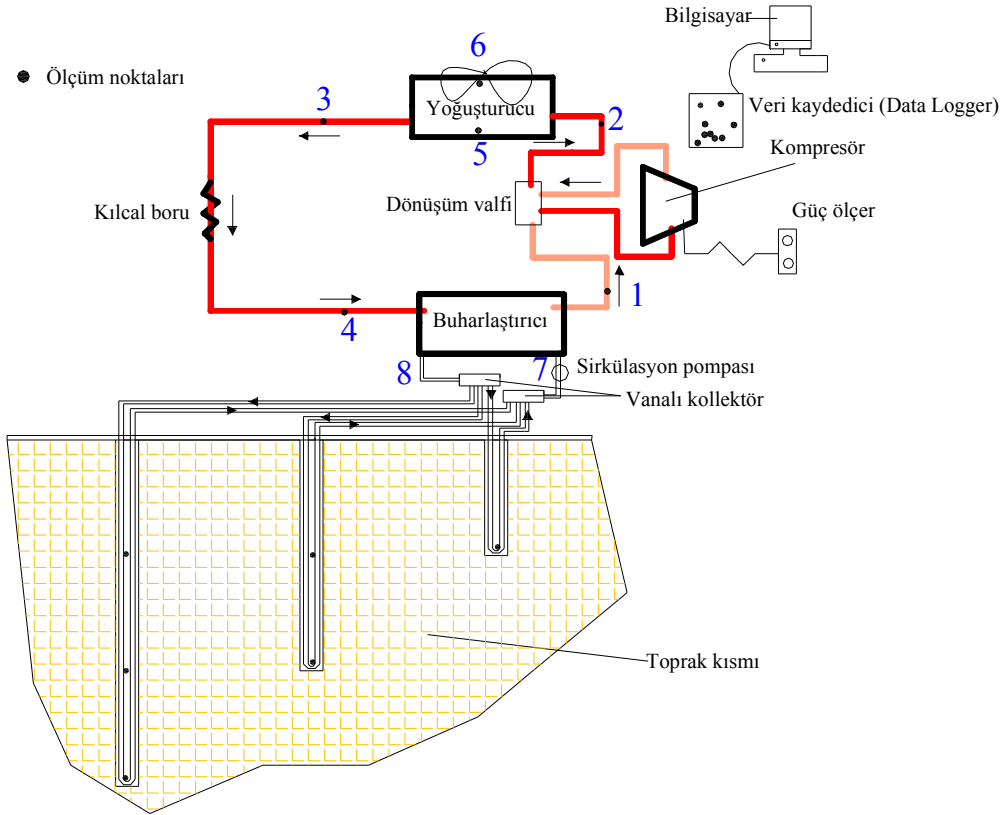
Tablo 6.3. Soğutma modunda 90 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	- 12	3.3	400.35	1.7689	0.034	32.857	1.084
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	40/79.17	15.27	449.03	1.7970	0.034	69.125	2.281
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	27	10.98	232.79	1.1128	0.034	55.610	1.83
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	5.5	5.93	206.62	1.0237	0.034	55.259	1.823
Buharlaştırıcı fanına giriş (5)	Hava	Gaz	20.6	1.013	60.5	0.211	0.73	1.3971	1.0198
Buharlaştırıcı fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	12.78	1.013	36.18	0.13	0.73	0.81	0.5913
Toprak ısı değiştirgecisinden su-antifiriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	27.3	3	114	0.397	0.43	0.6228	0.267
Toprak ısı değiştirgecine su-antifiriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	33.55	3.06	139	0.481	0.43	1.0108	0.434

Sonuç olarak, soğutma periyodu için yapılan ekserji analizi hesaplamalarından bulunan sonuçlar şöyle özetlenebilir: Isı pompası ünite bazında 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için ekserji verimleri sırasıyla %70, 78.3 ve 82.6 iken sistem bazında ise ekserji verimleri sırasıyla % 68.4, 71.3 ve 75.8'dir. Ekserji kaybı değerleri, 30 m'lik sistem için kompresör, yoğusturucu, kılcal boru, buharlaştırıcı ve TID'da sırasıyla 0.358, 0.342, 0.2, 0.368 ve 0.233 olarak bulunmuştur. Aynı değerler 60 m'lik sistem için sırasıyla 0.328, 0.165, 0.018, 0.325 ve 0.347, 90 m'lik sistem için de 0.323, 0.702, 0.016, 0.309 ve 0.290 olarak hesaplanmıştır.

6.1.4.2. Isıtma periyodu için ekserji analizi

(6.16)-(6.29) eşitlikleri kullanılarak TKIP sisteminin bileşenleri için korunum eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler, kompresör, yoğusturucu, kılcal boru, buharlaştırıcı, yoğusturucu fanı ve TID bileşenleri için ısıtma modunda türetilmiştir. Isıtma periyodunda sistem üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Isıtma periyodu için sistem üzerindeki ölçüm noktaları

Kompresör:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{soğ} , \quad (6.36a)$$

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{soğ} (h_{2gerçek} - h_1) , \quad (6.36b)$$

$$\dot{E}x_{k,komp,e} = T_0 \dot{m}_{soğ} (s_1 - s_{2gerçek}) , \quad (6.36c)$$

$$\dot{E}x_{k,komp} = \dot{m}_{soğ} (\psi_1 - \psi_{2gerçek}) + \dot{W}_{komp} , \quad (6.36d)$$

Bu eşitliklerde çevreye karşı ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Yoğuşturucu:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{soğ} ; \dot{m}_6 = \dot{m}_5 = \dot{m}_{hava} , \quad (6.37a)$$

$$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_{soğ} (h_{2gerçek} - h_3) , \quad (6.37b)$$

$$\dot{E}x_{k,yoğ,e} = T_0 [\dot{m}_{soğ} (s_3 - s_2) + \dot{m}_{hava} (s_5 - s_6)] , \quad (6.37c)$$

$$\dot{E}x_{k,yoğ} = \dot{m}_{soğ} (\psi_{2gerçek} - \psi_3) + \dot{m}_{hava} (\psi_6 - \psi_5) . \quad (6.37d)$$

Kılcal boru:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{soğ} , \quad (6.38a)$$

$$h_3 = h_4 , \quad (6.38b)$$

$$\dot{E}x_{k,kb,e} = T_0 \dot{m}_{soğ} (s_4 - s_3) , \quad (6.38c)$$

$$\dot{E}x_{k,kb} = \dot{m}_{soğ} (\psi_3 - \psi_4) . \quad (6.38d)$$

Buharlaştırıcı:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{soğ} , \quad (6.39a)$$

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_{soğ} (h_1 - h_4) ; \dot{Q}_{buh} = \dot{Q}_{TID} , \quad (6.39b)$$

$$\dot{E}x_{k,buh,e} = T_0 [\dot{m}_{soğ} (s_1 - s_4) + \dot{m}_{hava} (s_7 - s_8)] , \quad (6.39c)$$

$$\dot{E}x_{k,buh} = \dot{m}_{soğ} (\psi_4 - \psi_1) + \dot{m}_{hava} (\psi_8 - \psi_7) . \quad (6.39d)$$

Yoğuşturucu fanı (yf):

$$\dot{m}_{hava,g} = \dot{m}_{hava,\zeta} = \dot{m}_{hava}, \quad (6.40a)$$

$$\dot{Q}_{yf} = \dot{m}_{hava} C_{p,hava} (T_{hava,\zeta} - T_{hava,g}); \dot{Q}_{yf} = \dot{Q}_{yoğ}; \dot{Q}_{iyükü} = \dot{Q}_{yoğ}, \quad (6.40b)$$

$$\dot{Ex}_{k,yf,e} = T_0 \left[\dot{m}_{hava} (s_6 - s_5) + \frac{\dot{Q}_{yf}}{T_{iç,hava}} \right], \quad (6.40c)$$

$$\dot{Ex}_{k,yf} = \dot{m}_{hava} (\psi_5 - \psi_6) - \dot{Q}_{yf} \left(1 - \frac{T_0}{T_{iç,hava}} \right). \quad (6.40d)$$

Toprak ısı değiştiricileri (TID, U borusu çevrimi):

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{sa}, \quad (6.41a)$$

$$\dot{Q}_{TID} = \dot{m}_{sa} C_{p,sa} (T_8 - T_7), \quad (6.41b)$$

$$\dot{Ex}_{k,TID,e} = T_0 \left[\dot{m}_{sa} (s_8 - s_7) - \frac{\dot{Q}_{TID}}{T_{toprak}} \right], \quad (6.41c)$$

$$\dot{Ex}_{k,TID} = \dot{m}_{sa} (\psi_7 - \psi_8) + \dot{Q}_{TID} \left(1 - \frac{T_0}{T_{toprak}} \right). \quad (6.41d)$$

Isıtma periyodu için yapılan ekserji analizinde elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Tablo 6.4; 30 m'lik sistem için ölçülen sıcaklıklara bağlı olarak seçilen fiziksel özellikler ile hesaplanan ekserji değerlerini göstermektedir. Soğutma periyodunda R-22 gazı için bütün fiziksel özellikler Solkane hazır programından alınmıştır ve bu program sayesinde çevrimin herhangi bir noktasındaki ekserji miktarları da hesaplanmıştır [111]. Hava ve su-antifiriz karışımının fiziksel özellikleri de çeşitli kitaplardaki tablolardan faydalanarak bulunmuştur [114]. Akışkanların Şekil 6.5'de gösterilen noktalardaki fiziksel özellikleri tespit edildikten sonra, yukarıda verilen eşitliklerden yararlanarak ekserji hesaplamaları yapılmış ve çıkan sonuçlar Tablo (6.4-6.6)'da verilmiştir.

Tablo 6.4. Isıtma modunda 30 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	-11	3.42	400.75	1.7674	0.037	33.731	1.248
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	39/76.69	14.9	447.40	1.7944	0.037	68.588	2.537
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	29	11.57	235.27	1.1208	0.037	55.75	2.061
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	3	5.48	203.6	1.0130	0.037	55.359	2.04
Yoğuşturucu fanına giriş (5)	Hava	Gaz	33.48	1.013	120.003	0.413	0.73	1.7141	1.251
Yoğuşturucu fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	37.96	1.013	150.713	0.5135	0.73	2.9776	2.173
Toprak ısı değiştirgisinden su-antifriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	9.75	0.12	41.72	0.1450	0.43	2.17	0.933
Toprak ısı değiştirgisine su-antifriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	6.63	0.09	27	0.097	0.43	1.52	0.634

Tablo 6.5. Isıtma modunda 60 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	-9	3.68	401.54	1.7640	0.037	35.524	1.314
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	40/76.39	15.27	446.66	1.7902	0.037	69.126	2.55
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	30	11.88	236.50	1.1248	0.037	55.826	2.06
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	5	5.84	206.00	1.0215	0.037	55.277	2.04
Yoğuşturucu fanına giriş (5)	Hava	Gaz	33.48	1.013	120.003	0.41375	0.73	1.493	1.089
Yoğuşturucu fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	39.517	1.013	162.69	0.55205	0.73	3.66	2.671
Toprak ısı değiştirgisinden su-antifiriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	14.1	0.15	58.90	0.21	0.43	0.31	0.133
Toprak ısı değiştirgisine su-antifiriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	9.12	0.11	41	0.1490	0.43	0.29	0.1247

Tablo 6.6. Isıtma modunda 90 m’lik kuyu için belirlenen çeşitli fiziksel özellikler ve ekserji miktarları

Eleman	Akışkan	Faz	Sıcaklık, T (°C)	Basınç, P (Bar)	Özgül entalpi, h (kJ/kg)	Özgül entropi, s (kJ/kgK)	Kütleli debi, $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül ekserji, Ψ (kJ/kg)	Ekserji miktarı, $\dot{E}x = \dot{m}\Psi$ (kW)
-	R-22	Ölü hal	17	1.013	410.31	1.7261	-	0	0
-	Hava	Ölü hal	20	1.013	57.55	0.2057	-	0	0
-	Su-ant.	Ölü hal	20	1.013	83.96	0.2966	-	0	0
Buharlaştırıcı çıkış/kompresör giriş (1)	R-22	Kızgın buhar	-6.5	4.01	402.51	1.7601	0.037	37.622	1.392
Yoğuşturucu giriş/Kompresör çıkış (2)	R-22	Kızgın buhar	41/75.69	15.64	445.57	1.7851	0.037	69.648	2.576
Yoğuşturucu çıkış (3)	R-22	Sıvı	32	12.51	238.99	1.1328	0.037	55.993	2.07
Buharlaştırıcıya giriş (4)	R-22	Karışım	8	6.40	209.61	1.0343	0.037	55.19	2.04
Yoğuşturucu fanına giriş (5)	Hava	Gaz	33.56	1.013	120.005	0.4137	0.73	1.511	1.103
Yoğuşturucu fanından çıkış (6)	Hava	Gaz	40.48	1.013	169.081	0.578	0.73	2.451	1.789
Toprak ısı değiştirgecisinden su-antifiriz’in çıkışı (7)	Su-ant.	Sıvı	17.57	0.19	74.48	0.260	0.43	1.2438	0.534
Toprak ısı değiştirgecine su-antifiriz’in girişi (8)	Su-ant.	Sıvı	10.91	0.13	45.21	0.1658	0.43	0.4256	0.183

Sonuç olarak, ısıtma periyodu için yapılan ekserji analizi hesaplamalarından bulunan sonuçlar şöyle özetlenebilir: ısı pompasının ünite bazında 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için ekserji verimleri sırasıyla %64.1, 69.3 ve 71.4 iken sistem bazında ise bu değerler sırasıyla %60, 65.7 ve 66.6'dır. Bu değerler soğutma modunda çıkan değerlerle karşılaştırılmamalıdır, çünkü soğutma modunda çalışılan sistem üzerinde ısıtmaya geçerken bir takım değişiklikler yapılmıştır. Ekserji kaybı değerleri, 30 m'lik sistem için kompresör, yoğunlaştırucu, kılcal boru, buharlaştırıcı ve TID'da sırasıyla 0.291, 0.427, 0.013, 0.434 ve 0.211 olarak bulunmuştur. Aynı değerler 60 m'lik sistem için sırasıyla 0.287, 0.202, 0.024, 0.644 ve 0.101, 90 m'lik sistem için de 0.419, 0.737, 0.026, 0.229 ve 0.205 olarak hesaplanmıştır.

Çeşitli şekillerde tüm sistemin ekserji verimliliği iyileştirilebilir. Sistem bileşenlerinin tersinmezlikleri azaltılmalıdır. Kompresörün tersinmezliği büyük oranda giriş ve çıkış basınçlarına bağlıdır. Herhangi bir ısı değiştiricisinin verimliliğindeki iyileşme, yoğunlaştırucu ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının birbirine yakın olması yani sıcaklık farkının az olması sağlanarak kompresör gücündeki azalmayla yapılabilir. Son yıllarda, kompresör tersinmezliği, yeni geliştirilen motorlar, valfler ve yağlama ile büyük oranda azaltılmıştır [115].

7. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, sonlu elemanlar metodu ile sondaj deliği bölgesinin modellenmesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu; otomotiv, bina, uçak, köprülerdeki ısı akışı, akışkan hareketi, magnetik akı vb. uygulamalarda karşılaşılan problemlerin çözümünü kolaylaştıran ve gerçeğe çok yakın çözümler veren sayısal analiz yöntemidir. Çoğunlukla günlük hayatta pratik uygulamalarda kullanılır.

1960'lı yılların başlarında, mühendisler bu metodu gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve diğer alanlardaki problemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kullanmaya başlamıştır. 1955'de Angryis tarafından yazılan enerji teoremleri ve matris metotları ile ilgili kitap, sonlu elemanlar metodunun gelişimine temel hazırlamıştır. Sonlu elemanlarla ilgili, Zeşnkiewicz ve Chung tarafından yazılan ilk kitap 1967'de yayınlanmıştır. 1960'ların sonlarında ve 1970'lerin başlarında sonlu elemanlarla analiz yapan paket programlar yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Bu gelişmeler; karmaşık plakaların, kabuk yapıların ve katı rijit cisimlerde gerilme ve yer değiştirme analizlerini kolaylaştırmıştır [119].

Günümüzde, bilgisayar teknolojisi ve CAD sistemlerindeki ilerleme ile karmaşık problemlerin modeli yapılabilir hale gelmiştir. İlk prototipler (modeller) yapılmadan önce bilgisayarda birçok alternatif konfigürasyonlar yapılmaktadır. Burada bize düşen görev ise; bu gelişmeleri yakından takip ederek gelişmelere ayak uydurmaktır. Bu programlardan, mevcut çalışmada kullanılan ANSYS, gerilme ve ısı analizinde mükemmel sonuçlar vermektedir. İncelenmek istenilen cisim sonlu sayıda küçük elemana bölünerek inceleme yapıldığı için bu yönteme Sonlu Elemanlar Yöntemi (The Finite Element Method) adı verilmiştir.

Bu metot ile çözümü yapılacak bölge, düğüm noktalarından birbirine bağlı sonlu sayıda küçük elemana bölünür. Seçilen birim eleman, geometrik bir şekildir. Bunun amacı, geometrik yapısını bildiğimiz küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapmamızın kolay olmasıdır. Bu işlem ANSYS'te MESH komutuyla yapılır. Birim eleman boyunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzatır.

Sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapılırken izlenmesi gereken yol aşağıdaki gibidir [120]:

1. Yapıyı ya da sürekli elemanı birim elemanlara bölerek, birim elemanın boyutunu ve şeklini malzemenin fiziki özelliklerine göre seçmek gerekir.
2. Sonlu elemanlar birbirine düğüm noktalarından bağlanmış kabul edilirler. Bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri, basit yapıların analizlerinde olduğu gibi, problemin bilinmeyen ana parametreleridir.

3. Her bir sonlu elemanın yer değişimini tanımlamak için düğüm noktalarının, yer değişimleri cinsinden fonksiyonu seçilir (genelde bir polinomdur, polinomun derecesi birim elemanın düğüm sayısına bağlıdır).
4. Elemanla yer değiştirme fonksiyonları seçildikten sonra her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemleri oluşturulur. Bunun için dört yaklaşımdan biri kullanılır. Bu yaklaşımlar şunlardır:

I. Direkt Yaklaşım

II. Varyasyonel Yaklaşım

III. Ölçülmüş Kalıcı Yaklaşım

IV. Enerji Dengesi Yaklaşımı

5. Elemanlara bölünen sistemin özelliklerini toplamak gerekir. Bunu da elemanların matris denklemlerini birleştirerek sistemin davranışını ifade eden matris denklemleri oluşturmakla yapabiliriz. Sistemin matris denklemleri bir elemanın matris denklemleriyle aynı formdadır. Fakat sistemde denklemlerin terim sayısı fazladır.

İki boyutlu şekillerde dörtgen ve üçgen elemanlar oluşturmak yerine, eğrisel ve dik açılı elemanlar oluşturmak daha kullanışlıdır. Üç boyutlu cisimlerde ise tetrahedron (üçgen prizma) daha kullanışlıdır. Cismin şekline bağlı olarak bazen bu elemanların karışımından oluşan bir bölme oluşturmak da mümkündür.

Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları şöyle sıralanabilir:

- Sonlu elemanlar yöntemi, verilen şekil ne kadar karışık olursa olsun, şekle ve boyutlarına esneklik kazandırmaktadır.
- İlgili olduğu alanlar artırılabilir.
- Değişik malzeme özellikleri ve geometrisinde farklı güçlükler ortaya çıkarmaz.
- Sınır şartları kolayca tespit edilir.
- Sonlu elemanlar metodu, esnekliği sayesinde çok yönlü karmaşık yapılarda diğer problemlerdeki sonuç ilişkisinden daha etkin olarak kullanılır.
- Sonuçları diğer analitik veya deneysel metotlarla daha iyi karşılaştırılabilir.

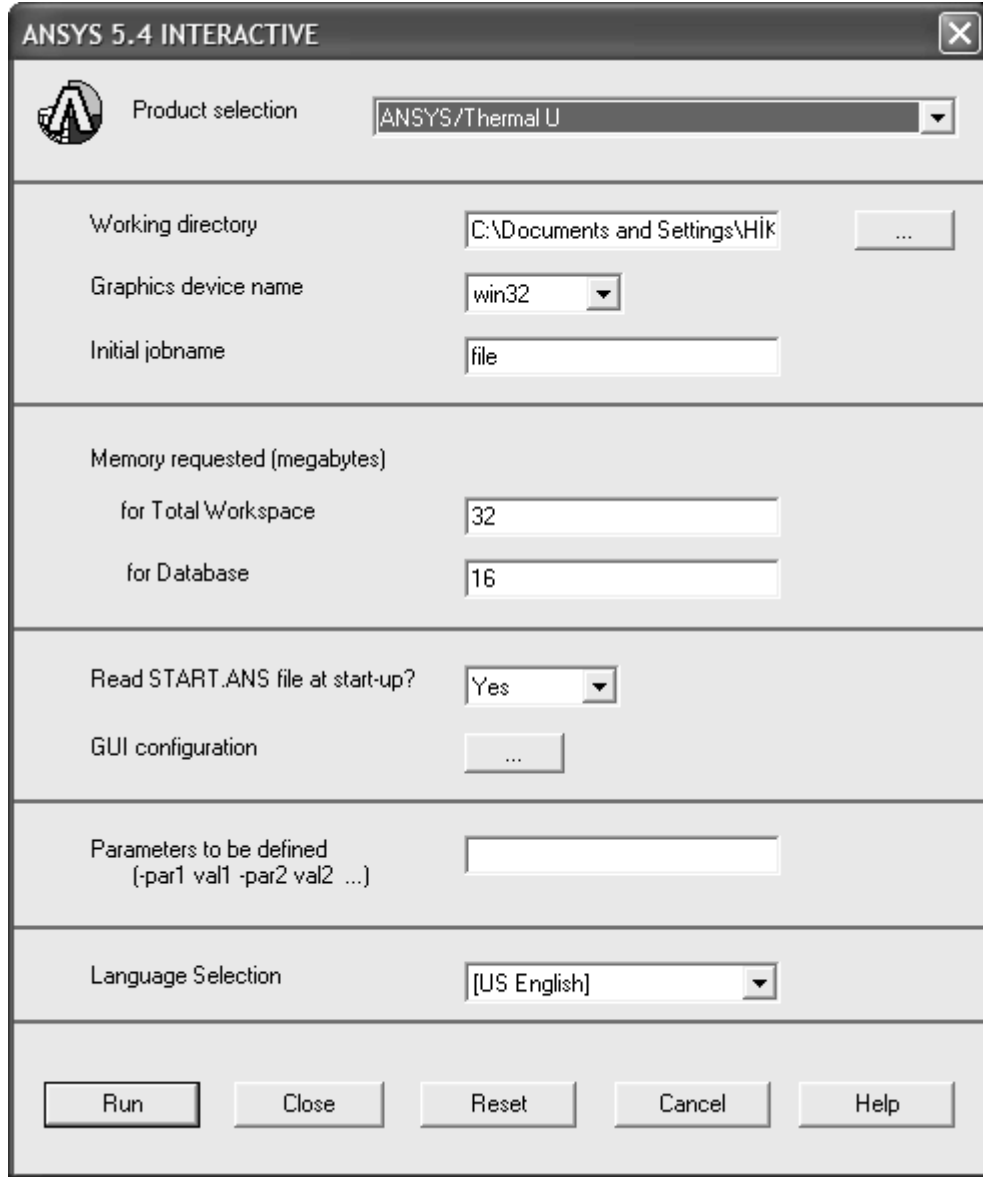
7.1. ANSYS Paket Programı

Mühendislik alanında sonlu elemanlar yöntemiyle çeşitli konularda analiz yapan programdır. Bu konular;

- Yapısal analiz,
- Termal analiz,
- Elektromagnetik analiz,
- Akışkan analizleridir.

Bu çalışmada, sayısal modellemede ANSYS 5.4 versiyonu kullanılmıştır. Programı çalıştırmak için START menüsünden programlar altında ANSYS adlı menüdeki INTERACTIVE seçeneği kullanılır. Aynı menü altında RUN INTERACTIVE NOW seçeneği ise bir önceki yapılan çalışmanın varsayılan yükleme işlemidir. Şekil 7.1’de interactive menüsünün görünümü verilmiştir. Açılan pencereden ANSYS’in ilk seçimleri yapılır. Bunlar;

- **Enable ANSYS Paralel Performance:** Bu modülü etkin kıldığımız vakit, program çift işlemci çalışır ve komplike problemleri veya hassas mesh’lenmiş parçaların çözüm zamanı azalır.
- **Drop Test Module:** Bu modülün etkinleştirilmesi için ANSYS/LS-DYNA tipinde çalışıyor olmamız gerekmektedir.
- **Working Directory:** Yaptığımız çalışma esnasında save dosyalarının korunması ve çeşitli hata mesajlarının saklanması için Hard Diskteki çalışma klasörüdür. Bu klasöre ayrıca yapılan animasyonlarda default olarak kayıt yapılır.
- **Memory Requested:** Programın çalışma esnasında bellekten kullanacağı alanı gösterir. Bu default değerler değiştirilebilir. Değerlerin arttırılması programın performansında bir değişiklik yapmaz, ancak programda uzun süre çalışılacaksa arttırılması nispeten daha randımanlı sonuçlar vermektedir.



Şekil 7.1. ANSYS programı interactive menüsü

7.1.1 ANSYS programında işlem menüleri

- **File:** Bu kısımda yeni bir çalışma başlatma, çalışma ismi, daha önceden kaydedilmiş dosyaları çağırma, yapılan yeni çalışmayı kaydetme veya programdan çıkış gibi karakteristik dosya işlemleri yapılabilir.
- **Select:** Model üzerinde çalışırken zaman zaman modelin kimi kısımlarının ayrı incelenmesi gerekebilmektedir. Bu genel görünümünden ayrı inceleme işlemleri select alt menüleri ile yapılabilir.
- **Plot:** Modelin nokta, çizgi, alan, elemanların gösteriminin ayarlandığı ve sonuçların ekranda görsel olarak ayarlandığı menüdür.

- **Plot Controls:** Modelin grafik ekranındaki görünüm açısının değişimi, perspektif, görüntü veya istenen şekillerde animasyon görüntüleri alınmasına yarar.
- **Work Plane:** Başlangıçta kullanılan kartezyen koordinat sistemi, bu menü yardımı ile silindirik, küresel, kutupsal sistemlere çevrilebilir. Ayrıca kullanıcıya, opsiyonel olarak kendi çalışma düzlemini yaratma seçenekleri de alt menülerde sunulmuştur.
- **Parameters:** Uygulanacak yüklerin bir fonksiyon halinde verilmesini sağlayan bir alt menüsü vardır.
- **Menü Controls:** Ekranda kullanılan pencerelerin açılıp kapanmasını sağlar.

7.1.2 ANSYS programı ana (main) menü

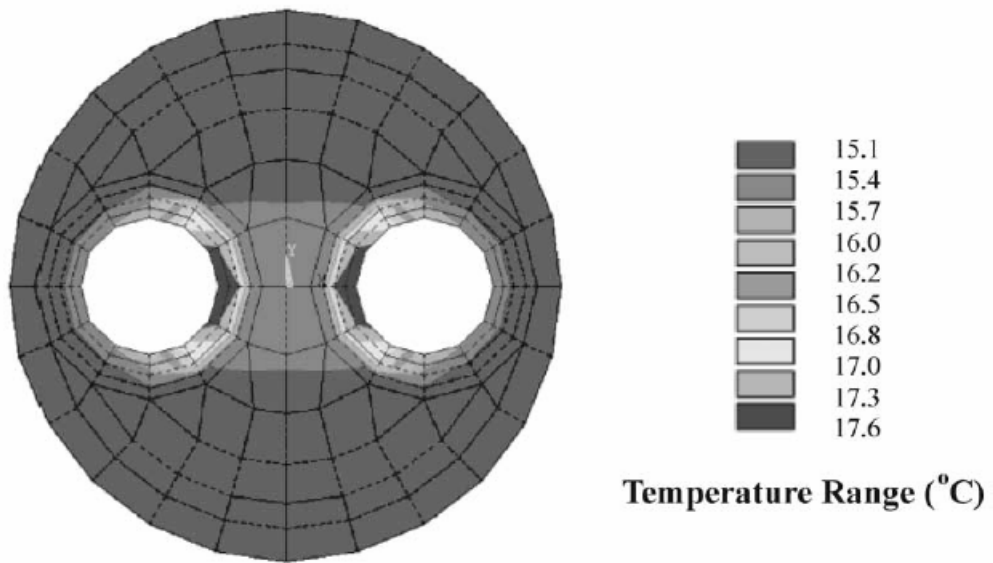
- **Preferences:** Analiz tipini belirterek, programın diğer analiz tipi ile ilgili olan menülerini elimine etmek için kullanılır. Neticede tek amacı görsel kolaylık sağlamaktır.
- **Preprocessor:** Bu alt menüde tüm ön çalışmalar yapılabilir. Malzemenin modellenmesi, sonlu elemanlara ayrılması (meshing), istenen yükün uygulanması, malzeme özelliklerinin belirtilmesi, birim sisteminin değiştirilmesi, sınır şartlarının uygulanması gibi işlemler bu menüden yapılabilir.
- **Solution:** Alt menüsündeki Current/LS komutu ile çözüm yaptırılır.
- **General Postprocessor:** Analiz sonuçlarının istenen şekilde okunması için kullanılan bölümdür.
- **Time Hist Postpro:** Geçmişteki çalışmalarla ilgili bilgileri içerir. Working Directory kısmından sonuç dosyalarını okuyabiliriz.
- **Run Time Stats:** Programın çalışıyor haldeki istatistikî bilgilerine ulaşabileceğimiz alt menüdür. İterasyon ayarları, sistem ayarları gibi ayarlar yapılabilir.

7.1.3 ANSYS programı çıkış (output) penceresi

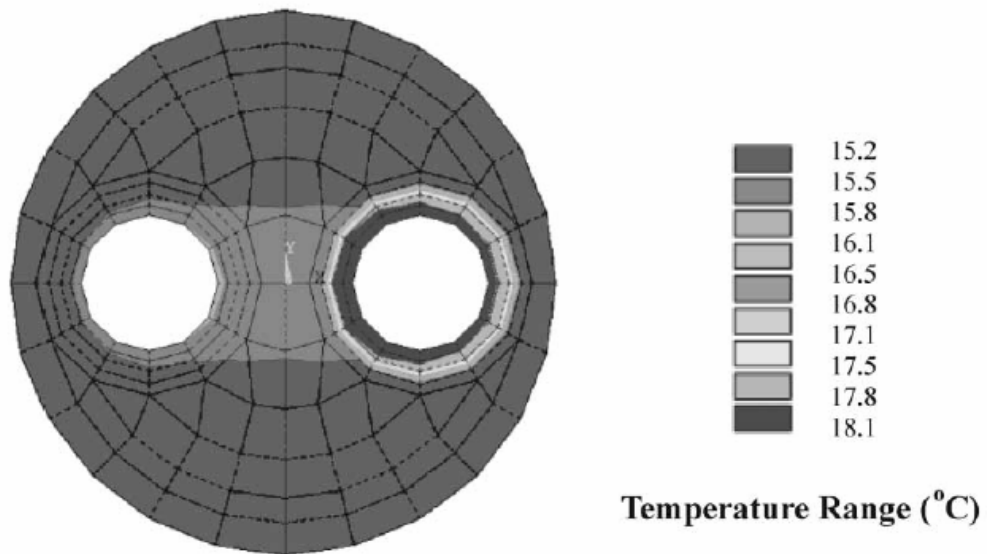
Bu pencerede ANSYS ile ilgili yaptığımız kişisel ayarlar, ayrıca çözüm esnasında programın yaptığı işlemler görülebilir. Kısacası programda yaptığımız çalışmanın aynısını bu pencerede görebiliriz.

7.2. Sondaj Kuyularındaki (Borehole) Sıcaklık Dağılımının Sayısal Analizi

Literatürde sondaj kuyularının sıcaklık dağılımının hesabı üzerine çok çalışma vardır [121–125]. Philippacopoulos ve Berndt [123] sondaj kuyusu içerisindeki U-boruları arasında bulunan bentonit dolgudaki boşluğun sıcaklık dağılımına etkisini ANSYS paket programını kullanarak araştırmışlardır. Şekil 7.2’de sondaj kuyusu içerisinde boşluk bulunmaması hali, Şekil 7.3’de ise sondaj deliği içerisinde boşluk bulunması halleri gösterilmiştir. Bu tür sistemlerde istenmeyen bir durum olan boşluğun hangi açılarda oluşabileceğinin analizi de yapılarak bazı çözümler önerilmiştir.

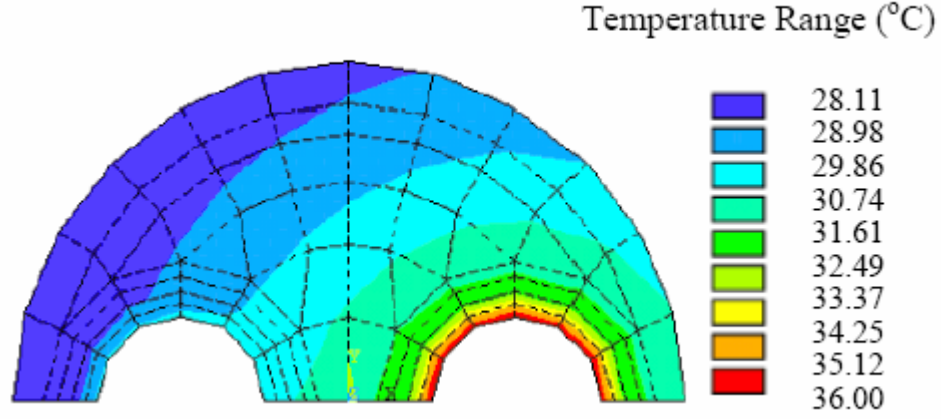


Şekil 7.2. Sondaj kuyusu içerisinde boşluk bulunmaması hali, (her iki borunun iç tarafında), [123]

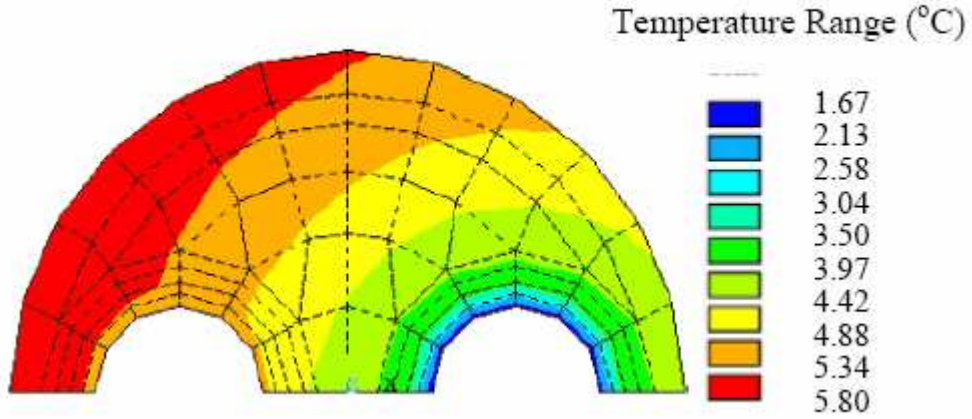


Şekil 7.3. Sondaj kuyusu içerisinde boşluk bulunması hali, (360 ° sağ taraftaki boruda), [123]

Allan ve Philippacopoulos [125] ise U-boruları ve dolgu malzemesinin özelliklerini kullanarak soğutma ve ısıtma modu için sondaj kuyularının sıcaklık dağılımını ANSYS ile hesaplamışlardır. Sonuçta, toprak ısı değiştiricisinin ısı yüküne karşı davranışının tahmininde sonlu eleman ile modellemenin en iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Şekil 7.4’de soğutma modu yük durumuna göre sondaj kuyusu sıcaklık dağılımı, Şekil 7.5’de ise ısıtma modu yük durumuna göre sondaj deliği içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Sondaj kuyusu içerisinde sıcaklık dağılımı (soğutma modunda), [125]



Şekil 7.5. Sondaj kuyusu içerisinde sıcaklık dağılımı (ısıtma modunda), [125]

Tezimizin bu kısmında bu makaleden [125] yararlanarak, gerçek (deneysel) verilerle bir sayısal model oluşturulmuştur. Bu modelleme aşağıda detaylı olarak sunulmuştur:

7.2.1. Modelleme, malzemenin tanıtılması ve yükleme durumları

Aralarında belirli mesafeler bulunan üç farklı derinlikteki ve 150 mm çapındaki sondaj kuyularının içinde bulunan 40 mm çapındaki U-borularının ısı atma ve ısı çekme yüklemelerine karşılık verdiği sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

7.2.2. Malzeme tipinin belirlenmesi

ANSYS'te çalışmaya başlamadan önce hangi sonlu eleman modelinin kullanılacağı belirlenir. İşlem adımları aşağıdaki gibidir:

Preprocessor > Element Type > Add / Edit / Delete > Add > Plane55

7.2.3 Malzeme özellikleri ve ön hazırlık

Tablo 7.1'de ANSYS programında işlem yapmadan önce gerekli olan veriler aşağıda gösterilmiştir. Sedimenter kayaç türünden olan marn toprağın ısıl özellikleri kullanılmıştır. Borunun özellikleri literatür'den [47] alınmıştır. Literatürdeki tablolardan bentonit dolgunun özellikleri ise Bölüm 4'de detaylı olarak verilen IDT'den elde edilen verilerden seçilmiştir.

Tablo 7.1. Analizi yapılacak olan malzemelerin özellikleri

	Toprak	Boru	Bentonit dolgu
Isı iletim katsayısı (k , W/mK)	2.55	0.4	1.70
Yoğunluk (ρ , kg/m ³)	2000	960	1540
Özgül ısı (C_p , J/kgK)	1400	2170	2030
Isıl yayılım katsayısı (α , m ² /h)	0.0018	0.81×10^{-3}	0.773×10^{-6}

ANSYS sonlu elemanlar metodu kullanarak çözüm yaparken, malzemenin tamamının modellenmesine gerek yoktur. Eğer yükleme sırasında malzeme simetrik davranacaksa bu

simetri eksenlerinden veya noktasından hayali bir bölme yaparak modelin yarısı veya dörtte biri oluşturulmalıdır.

Modeli sonlu elemanlara bölmek, başlangıçta eleman seçiminin doğru yapılmasıyla doğrudan ilişkilidir. Yani eleman tipine göre mesh tarzı değişir. Bizim modelimiz serbest meshlemeye uygundur.

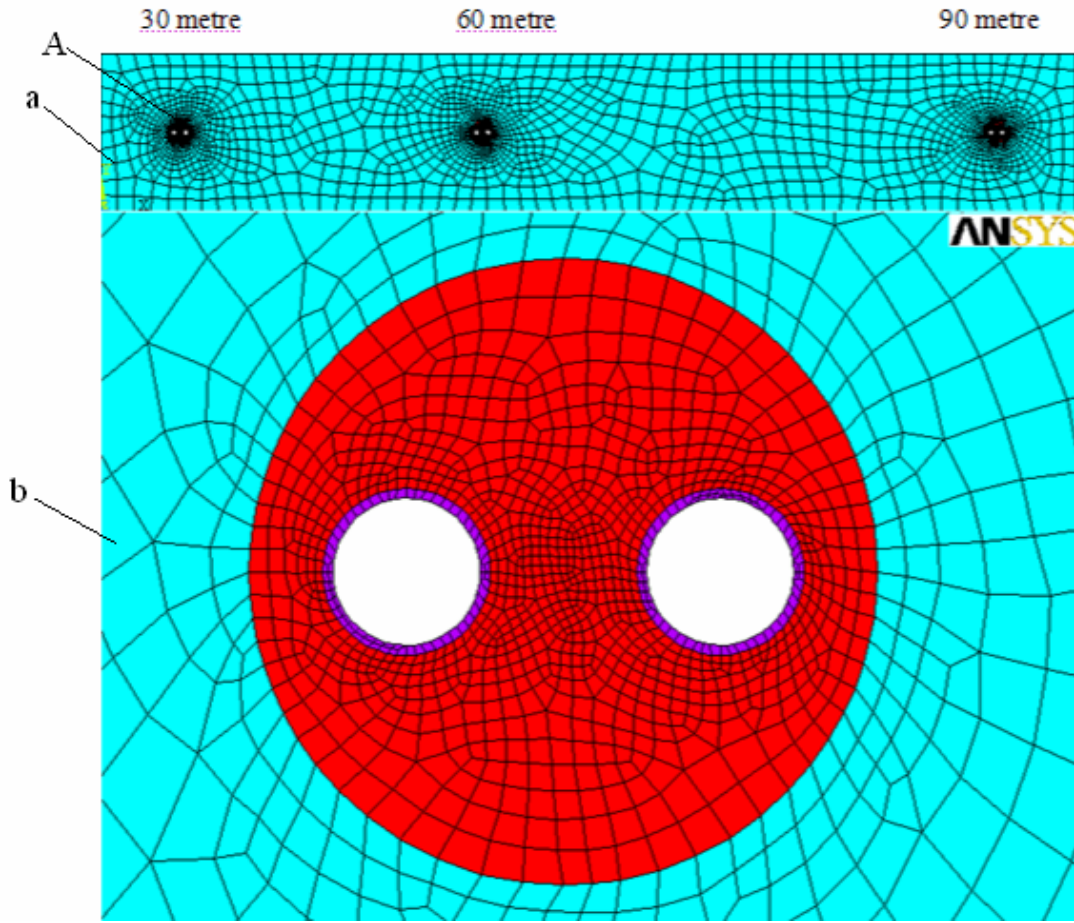
Yapılan çözümlerde 5648 adet sıcaklık serbestliğine sahip düğüm noktası ve 5441 adet bu serbestliğe sahip sonlu eleman kullanılmıştır.

Daha sonra soğutma ve ısıtma deneylerden alınan günlük ortalama su-antifiriz karışımı sıcaklık değerleri girilerek çözümler elde edilmiştir.

7.2.4. Soğutma modunda elde edilen çözümler

30, 60 ve 90 m derinliğindeki kuyular için ANSYS programından elde edilen çözümlerin sonlu eleman ağ sistemi Şekil 7.6 (a, b)'da gösterilmiştir. Boru cidarlarının mor renk ile gösterildiği şekilde kırmızı renk ile gösterilen bentonit dolguyu, turkuaz rengi ile gösterilen kısımlar da toprak kısmını göstermektedir. 30, 60 ve 90 m'lik kuyuların birbirleri arasında yatay eksen boyunca ısıl etkileşim görülmemiştir. Bu yüzden her bir kuyu tek başına incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucu soğutma modunda toprağın kararlı sıcaklığı 17.13 °C'dir. Su-antifiriz karışımı sıcaklığının günlük ortalama değerleri kullanılarak tüm hesaplamalar yapılmıştır.



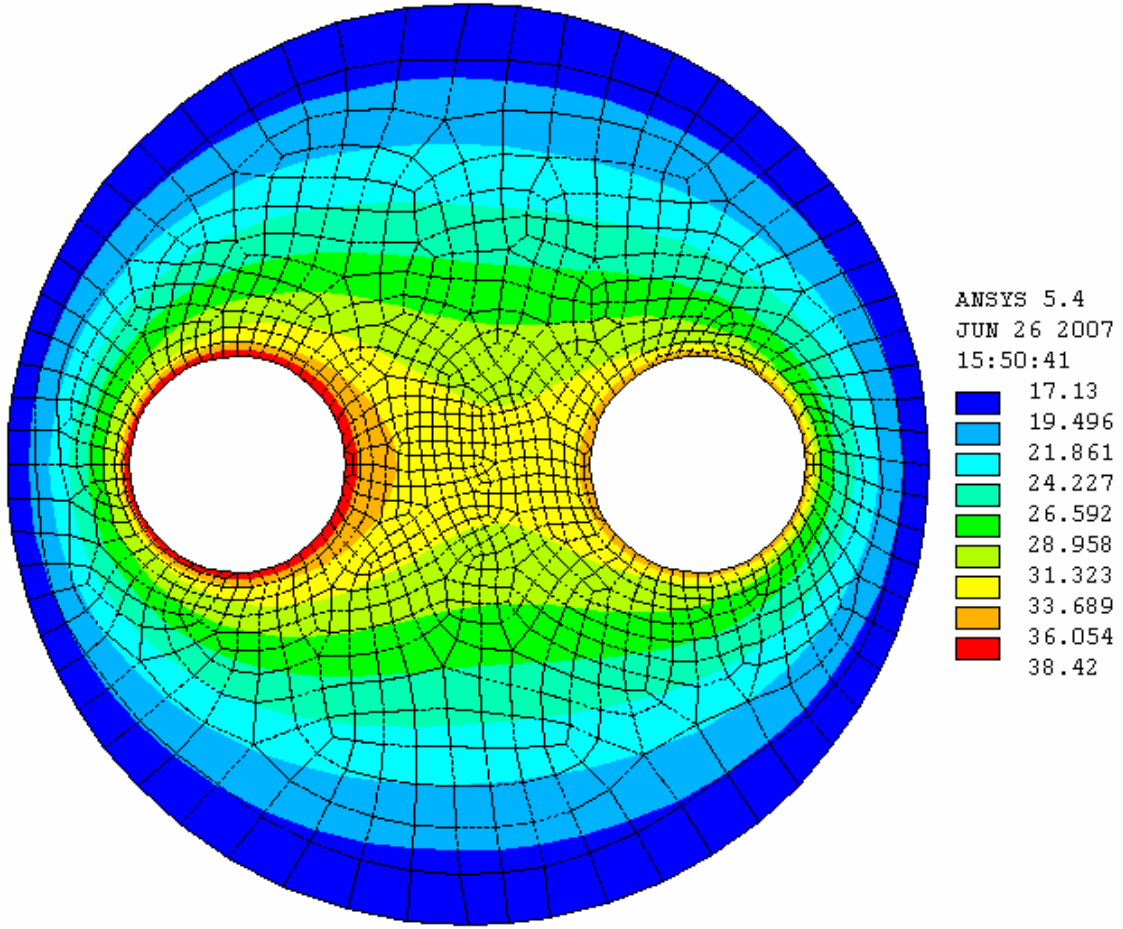
Şekil 7.6. 30, 60 ve 90 m’lik kuyuların a) tamamının, b) A detayının sonlu eleman ağ sistemi

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi 30 m ile 60 m’lik kuyular arasında 2 m, 60 m’lik kuyu ile 90 m’lik kuyu arasında 3.4 m’lik mesafe söz konusudur. Bu çalışmada, ilk önce eksenel yönde geometri oluşturulmuş ve çözümler elde edilmeye çalışılmıştır, ancak sondaj kuyusunun çapı (150 mm) ve U borusunun çapı (40 mm) eksenel yöne göre çok küçük olduğundan hassas çözümler oluşmamıştır. Bu yüzden literatürde de daha çok yer alan yatay yönde toprak sıcaklık dağılımı çalışması yapılmıştır [121-123]. Kuyular arasında etkileşim olmadığından sadece sondaj kuyusu içerisindeki yani bentonit dolgudaki sıcaklık dağılımı araştırılmıştır.

Boru içerisindeki sıcaklık değerleri, tüm kuyular için 30 m derinlikteki deneysel verilerden elde edilmiştir. Ancak, bentonit ve toprak bölgelerinde oluşabilecek sıcaklık dağılımı ise deneysel verilerden belirlenememiştir. Bu amaçla, tüm kuyuların 30 m derinliğindeki kesitleri dikkate alınarak çözümler elde edilmiştir.

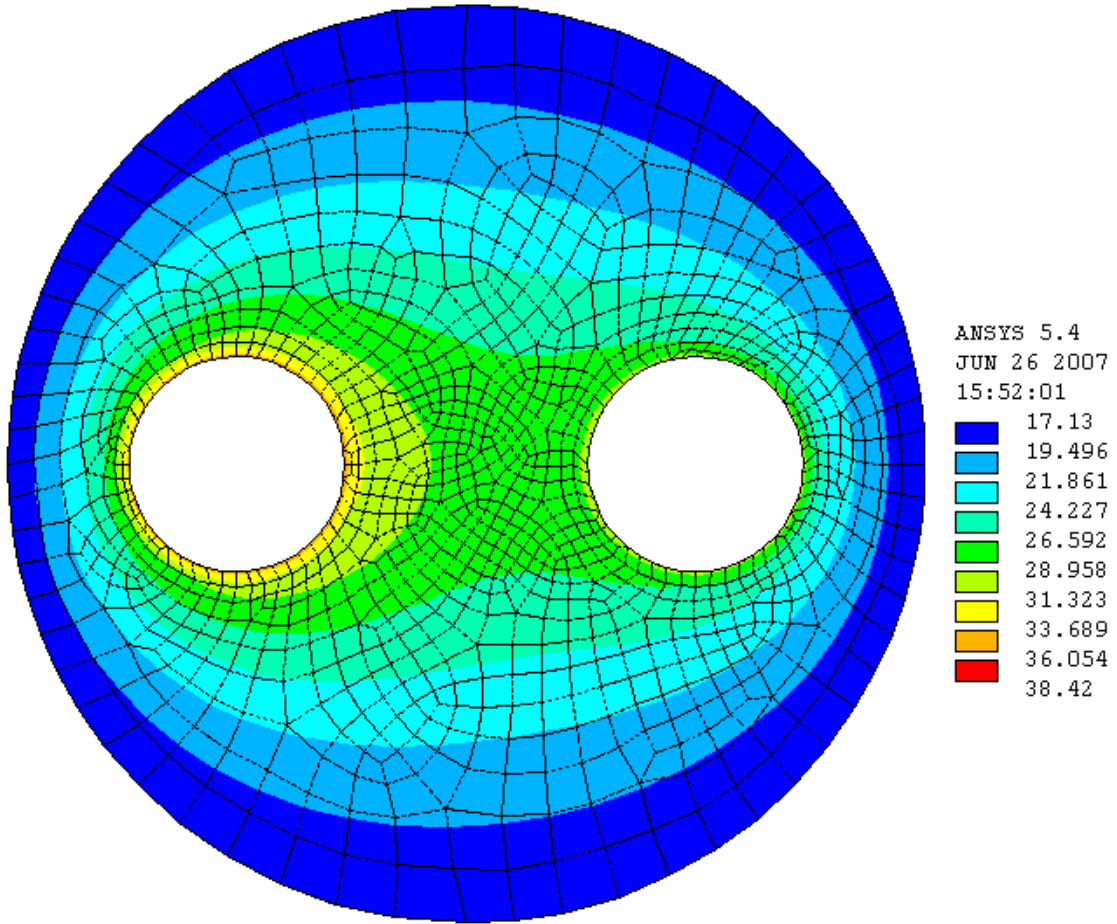
Soğutma modunda, 30, 60 ve 90 m’lik kuyular için sayısal çözümler birlikte yapılmıştır. Şekil 7.7’de 30 m’lik kuyudaki sondaj bölgesinin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Bu grafik; deneysel verilerden elde edilen 17.13 °C kararlı toprak sıcaklığına (undisturbed ground

temperature), 38.42 °C toprağa giriş su-antifiriz karışım sıcaklığına ve 34.94 °C topraktan çıkan su-antifiriz sıcaklığına göre çizilmiştir. Şekil 7.7'den görüldüğü gibi sol taraftaki boru toprağa gidiş kısmını sağ taraftaki boru da topraktan dönüş kısmını göstermektedir. Sol taraftaki borunun cidar sıcaklığı 38.42 °C iken sağ taraftaki borunun sıcaklığı da 34.94 °C'dir. Gidiş ve dönüş boruları arasında ısıl etkileşim oldukça fazladır. Ancak, borulara daha uzak olan bölgelerde bir sıcaklık azalması söz konusudur. Bu durum söz konusu şekilde gösterilen renk değişimi ile açıkça görülmüştür. Bentonit'in sınır tabakasındaki sıcaklık dağılımı, mavi renk ile gösterilmiştir. Bu sınırdaki sıcaklık, 17.13 °C kararlı toprak sıcaklığına gelmiştir.



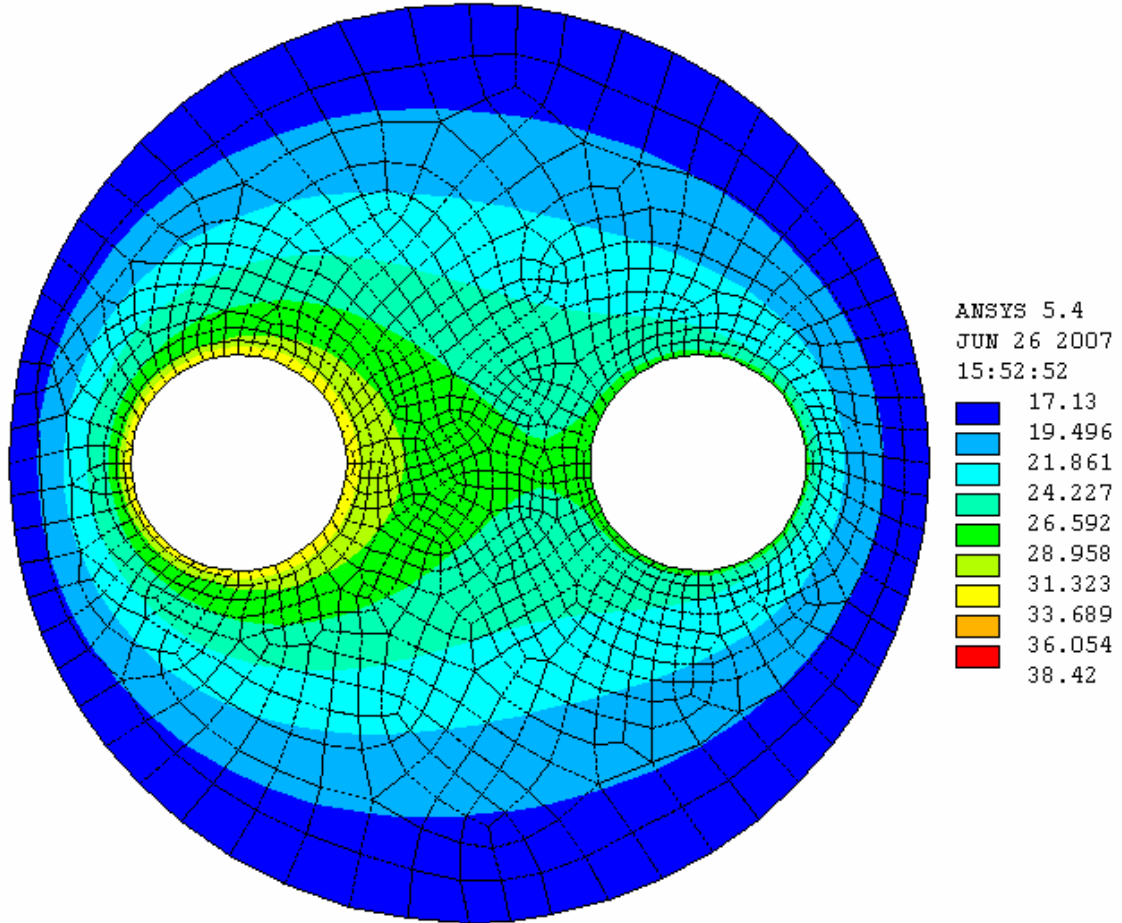
Şekil 7.7. Soğutma durumunda 30 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 7.8’de soğutma durumunda 60 m’lik kuyudaki sondaj kuyusu bölgesinin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Sol taraftaki boru cidarının sıcaklığı 34.19 °C iken sağ taraftaki borunun cidar sıcaklığı ise 29.44 °C’dir. İki boru arasındaki yatay eksen bölgesinde sağ taraftan sol tarafa doğru bir sıcaklık artışı söz konusudur. Borulardan uzaklaşıp bentonit’in dış sınır bölgesine gelindikçe sıcaklık, kararlı toprak sıcaklığı olan 17.13 °C değerine düşmüştür. Toprak bölgesinde, deney yaptığımız süre boyunca ısı etkileşiminin olmadığı görülmüştür.



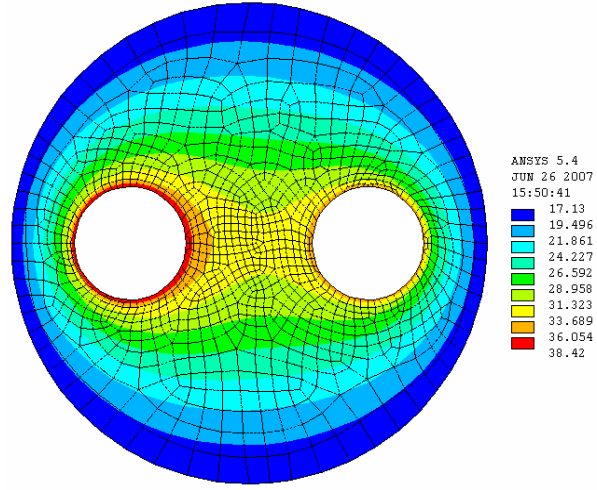
Şekil 7.8. Soğutma durumunda 60 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 7.9’da 90 m’lik kuyudaki sondaj deliği bölgesinin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Sol taraftaki boru cidar sıcaklığı sarı renk ile gösterilmiş olup bu değer 33.55 °C’dir. Sağ taraftaki boru ise bu çalışmalarda önemli bir parametre olan topraktan dönüş sıcaklığını göstermekte olup bu değer ise 27.3 °C’dir. İki boru arasındaki yatay eksen bölgesinde sağ taraftan sol tarafa doğru bir sıcaklık artışı söz konusudur. Borulardan uzaklaşıp bentonitin dış sınır bölgesine gelindikçe sıcaklık kararlı toprak sıcaklığı olan 17.13 °C değerine düşmüştür.

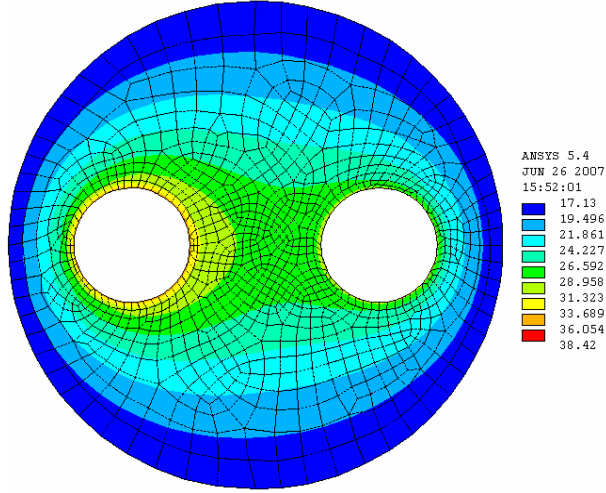


Şekil 7.9. Soğutma durumunda 90 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

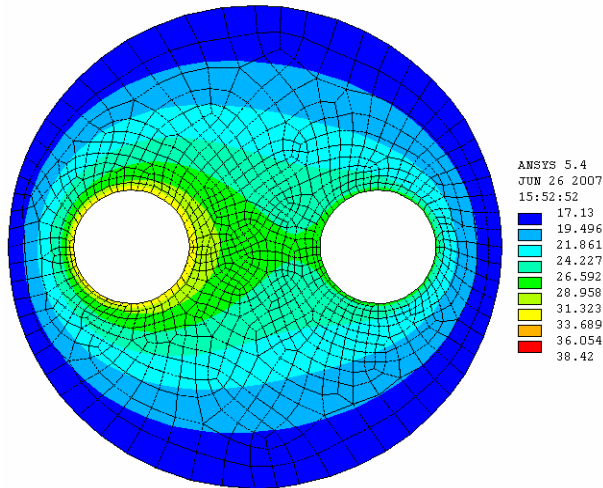
Şekil 7.10’da da üç farklı sondaj deliği dolgusunun soğutma modu için sıcaklık dağılımının birlikte görünümü verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi U-borusunun gidiş dönüş hattı arasındaki bölgede sıcaklık değişimi, borular arasındaki ısı etkileşiminden dolayı diğer bölgelere göre daha yüksektir. Kuyu derinliği arttıkça gidiş dönüş hattı arasındaki sıcaklık farkının da arttığı açıkça görülmektedir.



30 metre



60 metre



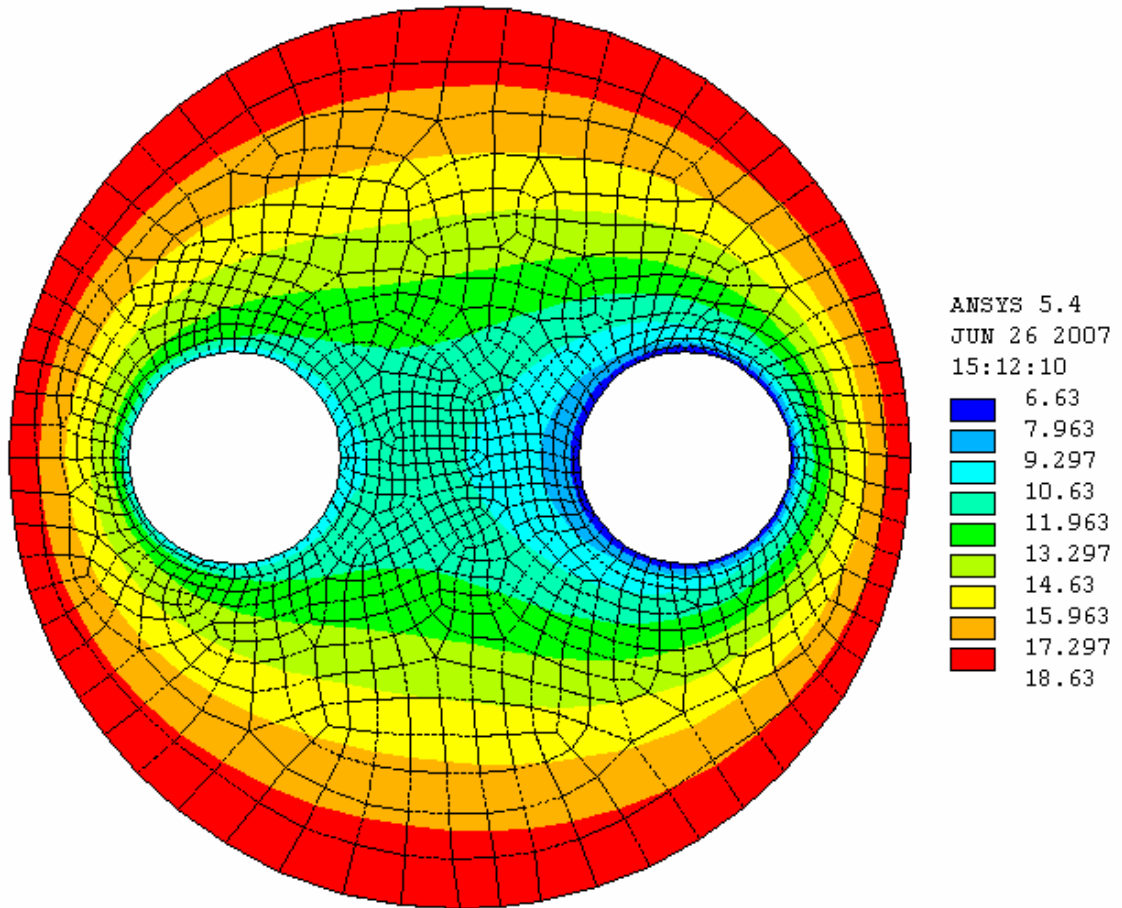
90 metre

Şekil 7.10. Soğutma modunda üç farklı kuyunun sıcaklık dağılımının birlikte görünümü

7.2.5. Isıtma modunda elde edilen çözümler

Yapılan deneyler sonucu, ısıtma modunda toprağın kararlı sıcaklığı 18.63 °C'dir. Su-antifiriz karışımının sıcaklığının günlük ortalama değerleri kullanılarak tüm hesaplamalar yapılmıştır.

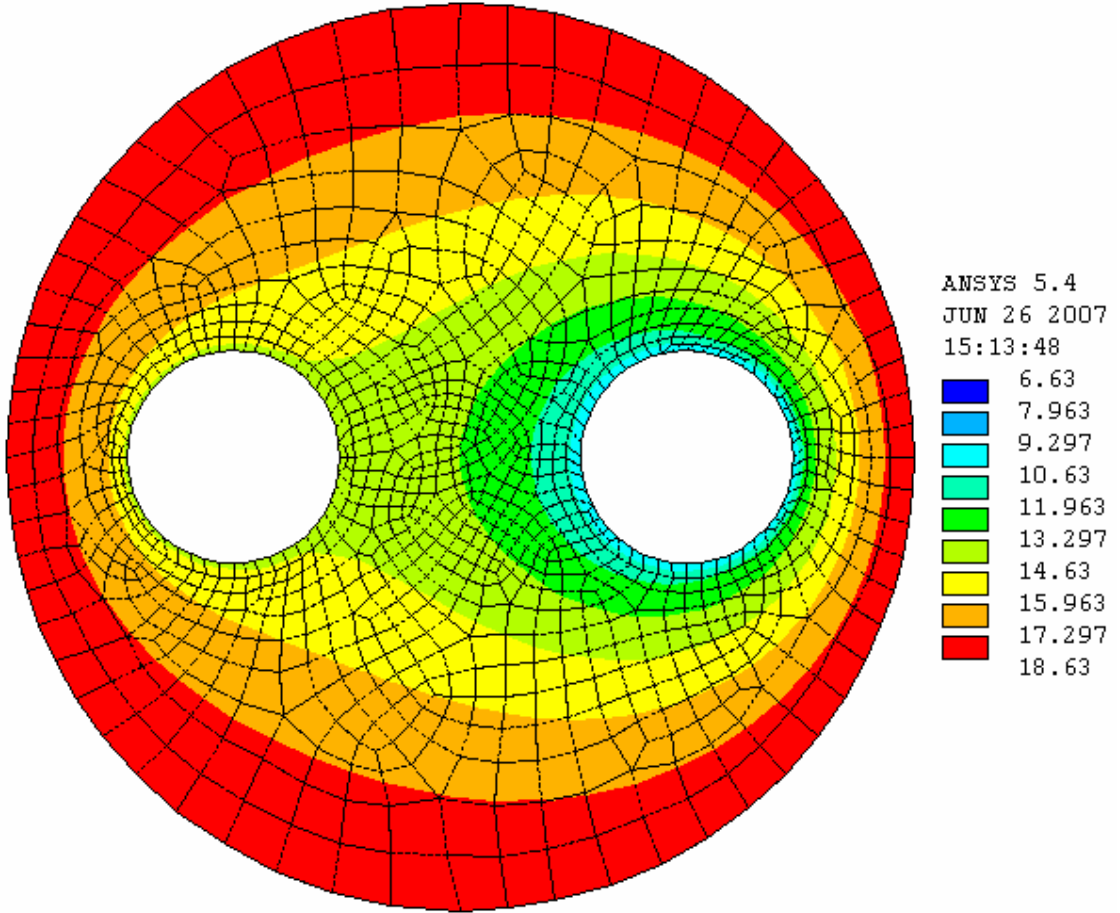
30 m'lik kuyudaki sondaj kuyusu bölgesinin sıcaklık dağılımı Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Sol taraftaki boru, topraktan dönen su-antifiriz karışımı tarafını sağ taraftaki boru ise toprağa giden su-antifiriz karışımı tarafını göstermektedir. Sol taraftaki boru cidar sıcaklığı 9.75 °C iken sağ taraftaki boru cidar sıcaklığı ise 6.63 °C'dir. İki borunun eksenleri arasında ısıl etkileşim oldukça fazla olmuştur, toprak kısmına gidildikçe de bu etkileşim azalmıştır. Borulardan daha uzak bölgelerde bentonitin dış sınır bölgesine gelindikçe sıcaklık kararlı toprak sıcaklığı olan 18.63 °C değerine çıkmıştır.



Şekil 7.11. Isıtma durumunda 30 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

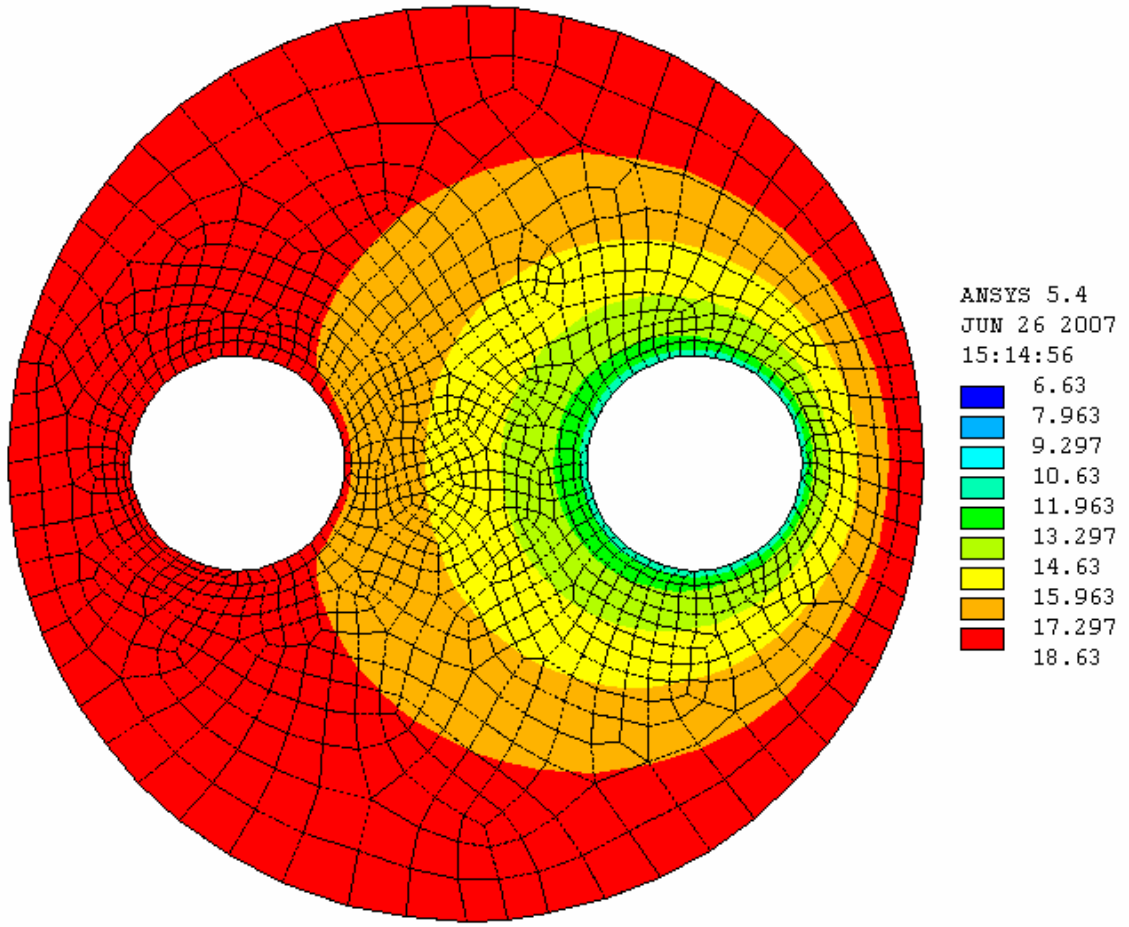
Şekil 7.12'de 60 m'lik kuyudaki sondaj kuyusu bölgesinin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Sol taraftaki toprak kısmından gelen su-antifiriz karışımını taşıyan boru cidar

sıcaklığı 14.1 °C iken sağ taraftaki toprak kısmına giden su-antifiriz karışımını taşıyan boru cidar sıcaklığı 9.12 °C'dir. İki boru arasında yeşil ve yeşilimsi renk ile gösterilen bölgelerde ısı etkileşim oldukça fazla olmuştur. Bentonit dolgunun bittiği sınır bölgelerde sıcaklık, kararlı toprak sıcaklığı olan 18.63 °C değerine çıkmıştır.



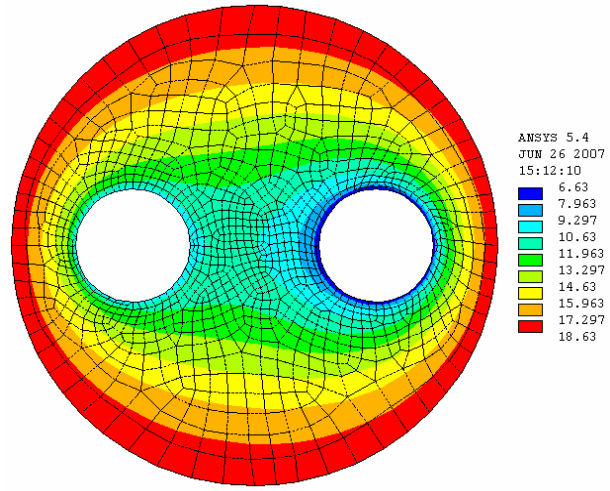
Şekil 7.12. Isıtma durumunda 60 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 7.13'de 90 m'lik kuyudaki sondaj kuyusu bölgesinin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Sol taraftaki toprak kısmından gelen su-antifiriz karışımını taşıyan boru cidar sıcaklığı 17.57 °C iken sağ taraftaki toprak kısmına giden su-antifiriz karışımını taşıyan boru cidar sıcaklığı 10.91 °C'dir. İki boru arasındaki bölgede ısı etkileşim oldukça fazla olmuştur. Bentonit dolgunun bittiği sınır bölgelerde sıcaklık, kararlı toprak sıcaklığı olan 18.63 °C değerine çıkmıştır.

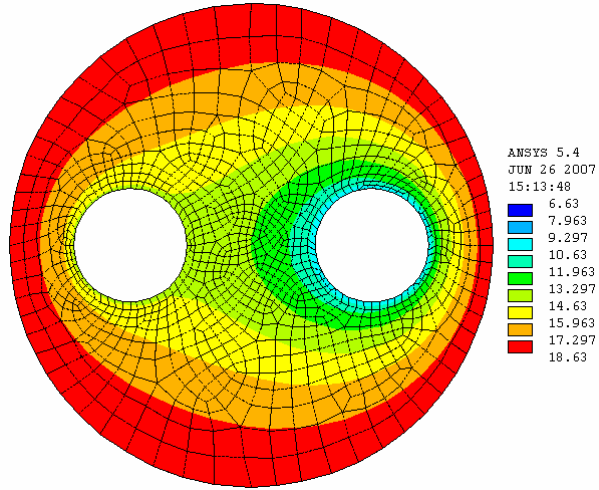


Şekil 7.13. Isıtma durumunda 90 m derinliğindeki sondaj kuyusunda oluşan sıcaklık dağılımı

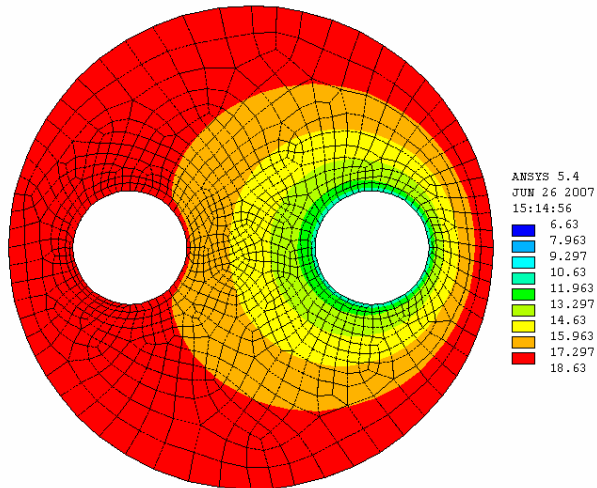
Şekil 7.14’de üç farklı sondaj deliği dolgusunun ısıtma modu için sıcaklık dağılımının birlikte görünümü verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, U-borusunun su-antifriz karışımı, toprağa gidiş veya topraktan dönüş hattı arasındaki bölgede sıcaklık değişimi, borular arasındaki ısı etkileşiminden dolayı diğer bölgelere göre daha yüksektir. Kuyu derinliği arttıkça gidiş dönüş hattı arasındaki sıcaklık farkının da arttığı açıkça görülmektedir.



30 metre



60 metre



90 metre

Şekil 7.14. Isıtma modunda üç farklı kuyunun sıcaklık dağılımının birlikte görünümü

8. YAPAY SİNİR AĞI VE UYARLAMALI BULANIK SİNİRSEL AĞI TABANLI MODELLEME

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, yapay zeka konusunda yapılan çalışmaları ve konuya olan ilgiyi artırmıştır. Bu nedenle, bilimsel çalışmalar daha da artmış ve bilim adamları farklı bakış açıları kazanmıştır. Özellikle beynin daha iyi anlaşılması için nöropsikolojik, psikolojik ve buna benzer davranışların üç boyutlu olarak algılanabilmesini sağlamıştır. Yapay zeka araştırmalarının ana amacı, insanın bilgi işleme prensiplerinin anlaşılması ve biyolojik sinir sistemlerinin çalışmasıdır. Ayrıca, bu disiplin daha esnek yetenekleri ile bilgisayarların gerek çalışmasına ve gerekse yapısına yeni yaklaşımlar kazandırmayı amaçlamaktadır [126]. Bu beklentilere cevap verebilmek için, zeki sistemler oluşturma çalışmalarına farklı bilim dallarından nörologlar, biyologlar, fizyologlar, mühendisler, matematikçiler, psikologlar ve fizikçiler bireysel veya birlikte işbirliği içinde çalışarak katkıda bulunmuşlardır.

Yapay zeka araştırmacılarının temel amacı; ideal, insan gibi düşünen ve davranan sistemler oluşturmaktır. Fakat buna ulaşmanın güçlüğü anlaşıncı, çalışmanın yönü rasyonel düşünen ve davranan sistemlerin tasarlanmasına çevrilmiştir.

Genel olarak yapay zeka teknikleri incelendiğinde; insanın sadece zekası veya beyninin çalışması yanında, vücudundaki diğer sistemlerinin çalışmalarını da taklit ederek veya farklı bir formata dönüştürerek problemlerin çözümünde uygulanmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşımlar, sadece insan vücudundaki sistemlerle de sınırlı kalmamış diğer canlılardan da örnekler alınmıştır.

Yapay zeka teknikleri, her geçen gün daha fazla gelişmektedir. Yeni ürünler ortaya çıkmakta ve daha çok günlük hayatta kendisini göstermektedir. Otomasyon sistemleri de yapay zeka teknolojisi ile donatılarak bilgisayarın karar verme gücünden faydalanılmaktadır. Yapay zeka teknikleri, Yapay Sinir Ağları (YSA), bulanık mantık (BM), sezgisel algoritmalar (genetik algoritmalar (GA), tabu arama, karınca algoritması, ısı işlemler, bağışıklık sistemi gibi), zeki etmenler ve uzman sistemler (US) olmak üzere gruplandırılırlar. Literatürde BM teorisini istatistiksel yaklaşım olarak kabul eden bilim adamları olsa da çoğu çalışmada yapay zeka yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir.

- Uzman sistemler: Bir uzmanın problemlerini çözdüğü gibi, problemlere de çözümler üreten sistemlerdir. Uzmanlık bilgisi ile donatılırlar. Çıkarım mekanizmaları bilgiler arasındaki ilişkileri kurarak kararlar verirler.
- YSA: Örneklerden olaylar arasındaki ilişkileri öğrenerek daha sonra hiç görmediği örnekler hakkında öğrendikleri bilgileri kullanarak karar veren sistemlerdir.

- Genetik algoritmalar: Geleneksel optimizasyon teknolojisi ile çözülemeyen problemleri çözmek üzere geliştirilmişlerdir. Problemlerin çözümlerini birleştirerek daha iyi çözümler üretmek felsefesine dayanmaktadır.
- Bulanık önermeler mantığı: Belirsiz bilgileri işleyebilme ve kesin rakamlar ile ifade edilemeyen durumlarda karar vermeyi kolaylaştıran bir teknolojidir.
- Zeki etmenler: Değişik yapay zeka tekniklerini kullanabilen ve bağımsız olarak çalışabilen sistemlerdir. Esnek bir şekilde programlanmaktadır [127].

Bu çalışmada, sadece YSA ve uyarlamalı bulanık sinirsel ağlar (UBSA) yapılarını kendi sistemimize uygulayacağız. Öncelikle, YSA ve UBSA ile ilgili genel tanımlar ve uygulama esasları verilecektir. Daha sonra bu yöntemlerin sistemimize uyarlanması anlatılacaktır.

8.1. YSA

8.1.1. YSA'nın uygulama alanları

Son yıllarda YSA, özellikle günümüze kadar çözümü güç ve karmaşık olan ya da ekonomik olmayan çok farklı alanlardaki problemlerin çözümüne uygulanmış ve genellikle başarılı sonuçlar alınabilmektedir. YSA'lar çok farklı alanlara uygulanabildiğinden bütün uygulama alanlarını burada sıralamak zor olmakla birlikte genel bir sınıflandırma ile YSA'nın uygulama alanları aşağıdaki gibi altı grup içerisinde toplanabilir [128]:

- **Arıza Analizi ve Tespiti:** Bir sistemin, cihazın ya da elemanın düzenli (doğru) çalışma şeklini öğrenen bir YSA yardımıyla bu sistemlerde meydana gelebilecek arızaların tanımlanma olanağı vardır. Bu amaçla YSA; elektrik makinalarının, uçakların yada bileşenlerinin, entegre devrelerin v.s. arıza analizinde kullanılmıştır.
- **Tıp Alanında:** Tıbbi sinyallerin analizi, kanserli hücrelerin analizi, protez tasarımı, transplantasyon zamanlarının optimizasyonu ve hastanelerde giderlerin optimizasyonu v.s gibi uygulama yeri bulmuştur.
- **Savunma Sanayi:** Silahların otomasyonu ve hedef izleme, nesneleri/görüntüleri ayırma ve tanıma, yeni algılayıcı tasarımı ve gürültü önleme v.s gibi alanlara uygulanmıştır.

- **Haberleşme** : Görüntü ve veri sıkıştırma, otomatik bilgi sunma servisleri, konuşmaların gerçek zamanda çevirisi v.s gibi alanlarda uygulama örnekleri vardır.
- **Üretim** : Üretim sistemlerinin optimizasyonu, ürün analizi ve tasarımı, ürünlerin (entegre, kağıt, kaynak v.s.) kalite analizi ve kontrolü, planlama ve yönetim analizi alanlarına uygulanmıştır.
- **Otomasyon ve Kontrol** : Uçaklarda otomatik pilot sistemi otomasyonu, ulaşım araçlarında otomatik yol bulma/gösterme, robot sistemlerin kontrolü, doğrusal olmayan sistem modelleme ve kontrolü, elektrikli sürücü sistemlerin kontrolü gibi yaygın uygulama alanları bulmuştur.

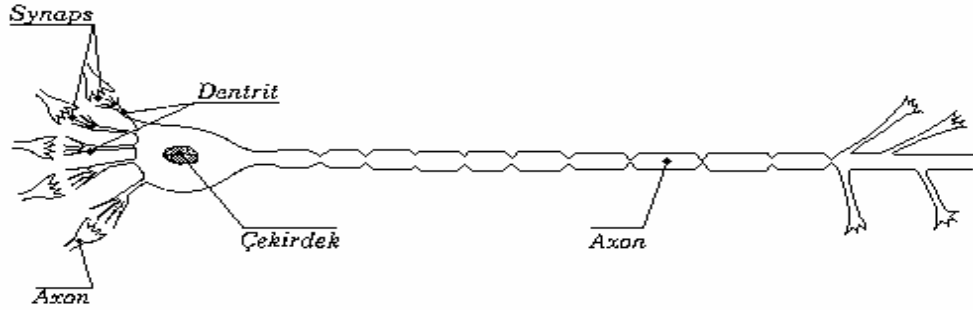
8.1.2. Sinir ağlarının biyolojik yapısı

Canlıları dış ortamdaki değişikliklere karşı kendi iç ortamını belirli sınırlar içerisinde koruyan sinir sistemi, sinir hücrelerinden meydana gelmiş bir yapıdır. Sinirler vücuttaki diğer hücrelerle birçok ortak özelliklere sahiptir ve aynı zamanda elektrokimyasal işaretleri algılama, işleme ve iletme özellikleri de vardır.

Canlı bir sinir sisteminin temelini oluşturan bir sinir hücresi Şekil 8.1’de görülmektedir. Sinir hücresi, bir hücre gövdesi ile dendrit ve akson adı verilen uzantılardan meydana gelir. Sinir hücresi, dendrit adı verilen bir kısım uzantılarla diğer sinir hücrelerinden aldığı işaretleri hücre gövdesine taşır ve hücre gövdesinde toplanan bu işaretler değerlendirilerek bir çıkış işareti üretilir ve bu işaretler akson adı verilen uzantılar vasıtasıyla diğer sinir hücresine gönderilir. Sinir hücresinde birçok dendrit olmasına karşın tek bir akson vardır. Yani bir sinir hücresinde birçok giriş bulunmasına rağmen tek bir çıkış vardır [127].

Sinir hücrelerinin en büyük özelliği ise, sinir hücresinin çevreden gelen işaretlere ya cevap vermesi ya da vermemesidir. Eğer sinir hücresine gelen işaret, eşik değerini aşarsa hücre tarafından kabul edilir ve cevaplandırılır, eşik değerini aşmıyorsa yok kabul edilerek hiçbir cevap üretilmez.

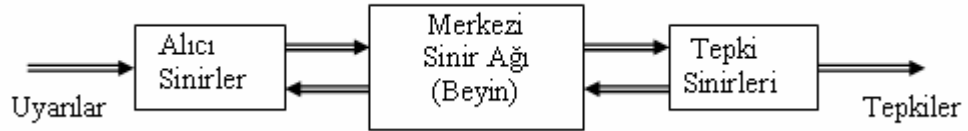
İki sinir hücresi arasında birinin dendriti ile diğerinin aksonu arasında bir bağlantı vardır ve bu bağlantı yerine sinaps adı verilir. Bu bağlantı yerinde sinirler birbirine bağlı değildir. İki hücre arasında küçük bir bağlantı bulunmamasına rağmen iki sinir hücresi darbeleri iletme için birbirine yeterince yakındır.



Şekil 8.1. Biyolojik sinir hücresi [128]

Birinci sinir hücresinin aksonu, sinir hücresinden aldığı işaret sonucunda şişer ve bu şişlik ikinci sinir hücresinin dendridinde bulunan algılayıcılar tarafından kaydedilerek, hücre zarının Na^+ ve K^+ iyonları geçirebilme yeteneğini değiştirme yönünde etkileyen kimyasal reaksiyonun başlamasına neden olur. Böylece, hücre zarı iyonların zarı geçmesine izin verir ve zar potansiyelini geçici olarak değiştirir [128].

Biyolojik sinir sistemi, merkezinde sürekli olarak bilgiyi alan, yorumlayan ve uygun bir karar üreten beynin (merkezi sinir ağı) bulunduğu 3 katmanlı bir sistem olarak açıklanır. Alıcı sinirler (receptor) organizma içerisinde ya da dış ortamlardan algıladıkları uyarıları, beyne bilgi ileten elektriksel sinyallere dönüştürür. Tepki sinirleri (effector) ise, beyinin ürettiği elektriksel darbeleri organizma çıktısı olarak uygun tepkilere dönüştürür. Şekil 8.2 de bir sinir sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Biyolojik sinir sisteminin blok diyagramı

Biyolojik beynin en önemli özelliklerinden birisi de, öğrenme olayıdır. İnsanlar ve hayvanlar, sürekli olarak içerisinde bulundukları çevre ile ilişki neticesinde bir öğrenme işlemi içerisindeyler. Öğrenilen her yeni bilgi, beynin fonksiyonlarını hemen etkileyerek, yapılan davranışlara yansır. YSA'nın gerçekleştirilmesinde bu özellik esas teşkil eder.

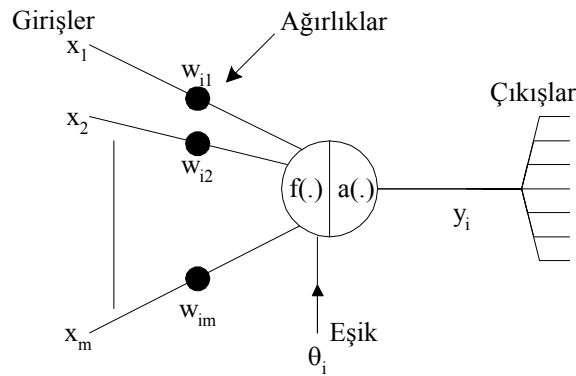
8.1.3. Yapay sinir ağının tanımı ve modeli

YSA genel bir deyişle, insan beyninin çalışma prensibini taklit etme esası üzerine kurulmuş bilgi işleme yöntemidir. Bu ağlar birbirine paralel olarak bağlanmış işlem elemanlarından (yapay sinir ağı hücresi, nöron, ünite, birim, düğüm) ve onların hiyerarşik bir

organizasyonundan oluşurlar. YSA'nın paralel yapıları; bilgisayarları geleneksel yöntemlerden çok daha farklı kullanarak özellikle seri bilgisayarlarda bilinen yöntemlerle yapılması mümkün olmayan ve çok zor olan bir takım işlevleri (ses ve örüntü tanıma gibi) rahatlıkla yapmalarını sağlar. YSA'nın temel düşüncesiyle insan beyninin fonksiyonları arasında benzerlikler vardır. YSA, her ne kadar temel yapı itibarıyla, bir kısım özellikleri ile insan beyninin fiziki özelliklerinden esinlenerek ortaya atılmış ise de, kesinlikle şu andaki mevcut durumları ile insan beyninin ne tam ne de yaklaşık bir modeli olarak değerlendirilemezler [127].

İnsan beyninin ne olduğu ve nasıl çalıştığı henüz tamamen keşfedilmiş değildir. Günümüzde her ne kadar karmaşık matematiksel hesaplamaları ve hafıza işlemlerini eldeki mevcut bilgisayarlarla hızlı ve doğru yapmak mümkün ise de, aynı bilgisayarlarla beynin birçok basit fonksiyonunu (görmek, duymak koklamak, ...vs.) yerine getirmek ya mümkün olmamakta ya da oldukça zor olmaktadır. Aynı şekilde biyolojik beyin, tecrübe ile öğrenme ve bilgiyi kendi kendine yorumlama, hatta eksik bilgilerden sonuçlar çıkartma kabiliyetine sahiptir. Bu, daha çok biyolojik sistemlerin, hücreler üzerinde dağıtılmış bilgiyi paralel olarak işleme özelliklerinden kaynaklanır. Hücreler birbirine bağlı ve paralel çalıştıklarından bazılarının işlevini yitirmesi halinde, diğerleri çalıştığı için sinir sistemi, fonksiyonunu tamamen yitirmez. İşte YSA, bu özellikleri bünyesinde toplayacak şekilde geliştirilmektedir.

YSA, biyolojik sinir ağları gibi yapay sinir hücrelerinin veya işlem elemanlarının bir araya gelmesinden oluşur. Her bir işlem elemanı Şekil 8.3'de görüldüğü gibi beş katmandan oluşur. Bunlar; girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkıştır.



Şekil 8.3. Yapay sinir hücresinin modeli [128]

Tıpkı biyolojik sinir hücresi gibi, işlem elemanına birden fazla giriş gelmekte ve sadece bir çıkış üretilmektedir. Girişler, dendritlere benzer şekilde diğer yapay hücrelerden ağlar vasıtasıyla işlem elemanına bilgi gelmesini sağlarlar. Bazı durumlarda bir işlem elemanı kendisine de bilgiyi geri gönderebilir (geri besleme). Bahsedilen bu bilgiler elemanlar arasında bulunan ağ hatları üzerinde depolanır. Her ağın bir ağırlığı vardır. Bu ağırlık bir işlem

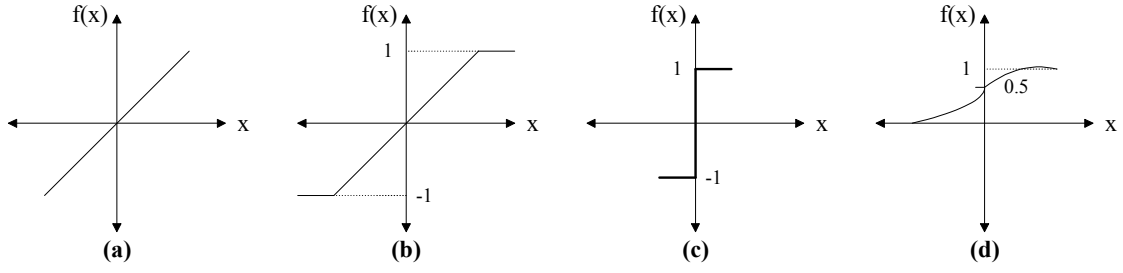
elemanının diğeri üzerindeki etkisini gösterir. Ağırlık büyüdükçe etki de büyür. Ağırlığın sıfır olması hiç bir etkinin olmaması, negatif olması ise etkinin ters yönde olması demektir. Bu ağırlıklar sabit olabildikleri gibi değişken de olabilirler. Toplama fonksiyonu, bir işlem elemanına gelen net girişi hesaplayan bir fonksiyondur. Net giriş genellikle gelen bilgilerin ilgili bağlantıların ağırlıkları ile çarpılıp toplanması ile belirlenir. Bu nedenle, toplama fonksiyonu olarak adlandırılır. Aktivasyon fonksiyonu da, toplama fonksiyonu tarafından belirlenen net girişi alarak, işlem elemanının çıkışını belirleyen fonksiyondur. Genel olarak türevi alınabilen bir fonksiyon olması tercih edilir. Toplama ve çıkış fonksiyonları, ilgili probleme bağlı olarak farklı şekiller alabilirler. İşlem elemanının çıkış ünitesi ise çıkış fonksiyonunun ürettiği dürtüyü diğer işlem elemanlarına veya dış dünyaya aktarma işlevini yapar. İşlem elemanları ağırlık topolojik yapısına bağlı olarak tamamen birbirinden bağımsız ve paralel olarak çalışabilirler. Bu üstün özellikleri, YSA'nın karmaşık problemleri çözebilme yeteneğini gösterir. Şekil 8.3'de biyolojik nörondan esinlenerek ortaya konmuş işlem elemanının basit bir matematiksel modeli gösterilmiştir. Bu modelde, i . işlem elemanının çıkışı Eşitlik (8.1)'de verilmiştir.

$$y(t+1) = a \left(\sum_{j=1}^m w_{ij} x_j(t) - \theta_i \right) \quad (8.1)$$

Burada $a(.)$ aktivasyon fonksiyonu, θ_i ise i . işlem elemanının eşik değeridir. İşlem elemanlarının bilgi işlemleri giriş ve çıkış olmak üzere iki kısımdan oluşur: bir işlem elemanı dışardan almış olduğu x_j giriş bilgilerini bağlı bulundukları w_{ij} ağırlıkları üzerinden birleştirerek bir *net* değeri üretir. i . işlem elemanının *net* değeri Eşitlik (8.2) ile hesaplanır.

$$f_i \triangleq \text{net}_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j - \theta_i \quad (8.2)$$

Her bir işlem elemanının ikinci adımı, *net* değerini bir $a(.)$ *aktivasyon* fonksiyonundan geçirerek çıkış değerini bulmaktır. Aktivasyon fonksiyonları işlem elemanlarının çok geniş aralıktaki çıkışını, belli aralıklara çekmektedir. Böylece her bir işlem elemanının tepkisi yumuşak olmaktadır ve ağırlıklarının değişimlerinin de daha küçük değerlerde olması sağlanır. Dolayısıyla YSA'nın eğitiminde, hata değişiminin ıraksaması engellenerek kararlılığa ulaşmasına yardımcı olunur. Şekil 8.4'te $a(.)$ fonksiyonu için kabul görmüş gerçek biyolojik sinirlerin transfer fonksiyonuna yakın lineer olmayan fonksiyonlar görülmektedir. En çok kullanılan dört tane aktivasyon fonksiyonu vardır. Bunlar, lineer (a), rampa (b), basamak (c) ve sigmoid (d) fonksiyonudur (Şekil 8.4).



Şekil 8.4. Aktivasyon fonksiyonları

8.1.4. YSA'nın yapıları ve çeşitleri

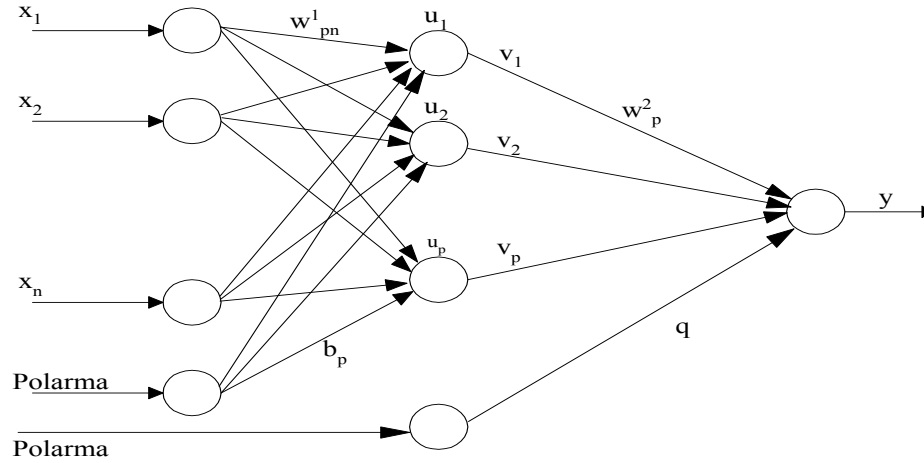
YSA'nın görevlerini gerçekleştirmede, sahip oldukları fiziksel yapının da önemi vardır. Bugün 50'ye yakın farklı yapılanma görülmekte ve bu sayı her geçen gün artmaktadır. Farklı yapılaşma, işlem elemanlarının birbirleri ile olan bağlantılarından ve uygulanan öğrenme kuralından kaynaklanmaktadır. İşlem elemanları ya tamamen birbirleri ile bağlantılı veya yerel olarak guruplar halinde bağlantılı olabildikleri gibi, değişik şekilde de birbirleri ile bağlanabilmektedirler. Bilgi akışı bu bağlantılar üzerinden tek yönlü olduğu gibi, çift yönlü de olabilir. Bir gurup işlem elemanı bir araya gelerek bir katman oluştururlar. Genel itibariyle YSA'da üç tür katman bulunur: sinir ağının dış dünya ile bağlantısını kuran giriş katmanı, gelen bilgileri işleme kabiliyetine sahip ara katmanlar ve sinir ağının kararlarını dış dünyaya aktaran bir çıkış katmanıdır (Şekil 8.5). Giriş katmanında çoğu zaman bilgi işleme söz konusu olmaz. Bu katmandaki işlem elemanları aldıkları bilgiyi herhangi bir değişikliğe uğratmadan ara katmandaki işlem elemanlarına aktarırlar. Burada sözü edilen bilgi, sinir ağının işlem elemanları arasındaki bağlantı hatları üzerinde bulunan ağırlıklarla ifade edilir. Dolayısı ile bilgi, bütün ağa dağıtılmış demektir. Bu bilgiler, yapay sinir ağının belleğidir veya diğer bir deyişle YSA eğitildikten sonra kullanılacağı sistem için bir veri tabanıdır.

Şekil 8.5'de tek yönlü ağların olduğu, bir katmandaki bilgilerin sadece bir sonraki katmana geçtiği ve yine bir katmandaki işlem elemanlarının bir sonraki katmana tamamen bağlandığı bir ağ yapısı gösterilmiştir. Çok bilinen geriye yayılım ağı (ileri beslemeli, katmanlı ağ) modeli bu tür yapıya örnek olarak verilebilir.

Geri beslemeli YSA'da en az bir hücrenin çıkışı kendisine ya da diğer hücrelere giriş olarak verilir ve genellikle geri besleme bir geciktirme elemanı üzerinden yapılır. Geri besleme, bir katmandaki hücreler arasında olur. Bu yapısı ile geri beslemeli yapay sinir ağı, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterir. Dolayısıyla, geri beslemenin yapılış şekline göre farklı yapıda ve davranışta geri beslemeli YSA yapıları elde edilebilir. Yayılma (Propagate) ve uyum gösterme (Adapt) olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren Standart Geri Yayılım

Algoritması (SBP), katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı, ileri beslemeli ve öğreticili olarak eğitilen bir YSA modelidir. Standart Geri Yayılım Algoritması; hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı bu ismi almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir katmandaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır.

YSA'nın en tanınmış olan ileri beslemeli ağ, çok katmanlı bir ağıdır. Widrow-Hoff öğrenme kuralının bir uzantısı olarak Rumelhart, Hinton ve Williams tarafından 1986 yılında gerçekleştirilmiştir [129]. Bu ağ, giriş ile çıkış katmanları arasında birden fazla katmanın kullanıldığı yapay sinir ağı sistemidir. Gizli katman olarak isimlendirilen bu ara katmanlarda, aracı giriş alamayan ve aracı çıkış veremeyen işlem elemanları vardır. Katmanlardaki hücreler arasında ve bir katmandan önceki katmana geriye doğru bir bağlantı yoktur. Şekil 8.5'de ileri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 8.5. İleri beslemeli ağ yapısı

Eğitici öğrenme kullanılarak eğitilen ileri beslemeli ağda, girişe bir giriş vektörü uygulanır ve çıkıştan bir çıkış vektörü elde edilir. Amaç her giriş vektörü için, ağın üreteceği cevabın istenilen çıkış vektörünün aynısı veya yeterince yakın değerlerde olmasını sağlayacak şekilde, ağırlık vektörleri oluşturmaktır. Yakın zamana kadar ileri beslemeli ağlar, eğitim algoritmalarının biyolojik sistemlere uygun olmamasına rağmen, son zamanlarda geliştirilen öğrenme algoritmalarıyla yaygın bir şekilde kullanımı sağlanmıştır.

İleri beslemeli ağın çıkışını elde etmek için, ileri yönde (girişten çıkışa) hesaplamalar yapılır. j . düğümün net girişi u_j , girişlerin bir lineer fonksiyonudur ve w_{ji} ağırlıklarıyla birlikte,

$$u_j = \sum_i x_i w_{ji} + b_j \quad (8.3)$$

şeklinde ifade edilir. Net girişin lineer olmayan fonksiyonu olan v_j ,

$$v_j = \frac{1 - e^{-u_j}}{1 + e^{-u_j}} \quad (8.4)$$

ile ifade edilir. Ara katman çıkışı v_j ile çıkış düğümü arasındaki ilişki doğrusaldır. Ağ çıkışı,

$$y = \sum_j v_j w_j^2 + q \quad (8.5)$$

şeklinde elde edilir. Giriş değerlerinin polarlama ağırlığı ile birleştirilmesi, öğrenmeyi kolaylaştırmaktadır. Başlangıçta tüm ağırlıklara küçük rasgele değerler atanır. Bu ağın simetrisini bozar ve ağırlıkların büyük değerlerle dolmuş hale gelmesini engeller. Giriş tabakasına $x_1, x_2 \dots x_n$ giriş vektörü uygulanır ve (8.3) - (8.5) eşitlikleri ile ağ çıkışları $y_1, y_2 \dots y_m$ hesaplanır (Aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu kullanıldığı kabul edilmiştir).

Katmanların boyutu hakkında genelleme yaparak bir değer vermek mümkün değildir. Giriş ve çıkış katmanlarının boyutu uygulamaya göre tespit edilir. Ancak ara katmanın boyutu belirsiz olmakla birlikte genellikle giriş katmanından daha büyük olmalıdır. Eğer ara katmandaki hücre sayısı az seçilirse, giriş değerleri arasından gerekli özellikleri tanımlamayabilir. Gereğinden fazla olması halinde ise, genelleme ve soyutlama hatasına düşebilir. Ortaya çıkan bu sorunun en iyi çözümü ortalama bir değer almaktır [128].

8.1.5. YSA'da öğrenme algoritmaları

Daha önce belirtildiği gibi bir yapay sinir ağının sahip olduğu bilgi, işlem elemanları arasındaki bağlantı hatları üzerinde saklanır ve ağırlıklar vasıtası ile gösterilir. Ağ, olaylar hakkında giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkiyi, elde bulunan mevcut örneklerden genellemeler yaparak öğrenir ve bu genelleme ile yeni oluşan ve ortaya çıkan daha önce hiç görülmemiş olaylar hakkında karar verir. Yani ağa, bir örnek olay gösterildiğinde, giriş katmanından alınıp ara katmanlarda işlenerek, ağın o olay hakkında ürettiği sonuç, çıkış katmanına sunulur. Bu bilgiyi işleme, ağın sahip olduğu tecrübeye göre, bilginin ara katmanlarda çağrıştırılması ile gerçekleştirilir. Bu çağrıştırma olayı modelden modele değişmektedir. Mesela, ara katmanlardaki işlem elemanları sahip oldukları bağlantılar ile kendi kararlarını üretir ve çıkış katmanındaki işlem elemanlarına gönderirler. Çıkış katmanındaki işlem elemanları da, yine ilgili ağırlıkları kullanarak ağın en son kararını oluştururlar. Bu ağırlıklar, tıpkı ilgili olayın belirli özelliklerini hafızada saklayan elemanlar gibi düşünülebilirler. Bilgi işleme ise (örüntü

tanıma gibi), bir olay gösterildiğinde hafızadan ilgili özellikleri çağırmak ve bunlar ile ilgili girişleri birlikte analiz ederek karar vermek şeklinde yorumlanabilir [128].

Yapay sinir ağının öğrenme işlemini gerçekleştirebilmesi için, sahip olduğu bütün ağırlıkların, ilgili problemde öğrenilmesi istenen özellikleri genelleştirecek şekilde doğru değerlere sahip olması gerekir. Bu doğruluk ne kadar artarsa ağın öğrenme işlemi o kadar iyi olur. Doğru ağırlık değerleri, bir öğrenme kuralına göre tespit edilirler. Çoğunlukla bağlantılara başlangıç değerleri olarak rasgele ağırlıklar atanır ve bu ağırlıklar eldeki örnekler incelendikçe bir kurala göre değiştirilerek doğru ağırlık değerleri bulunmaya çalışılır. Kısaca belirtmek gerekirse öğrenme kuralları, bir işlem elemanının örnekleri gördükçe kazandığı tecrübeye göre, ilgili bağlantı ağırlıklarını nasıl değiştireceğini belirleyen algoritmalarlardır. Öğrenme yöntemleri temelde üç grupta toplanır [130]:

- **Eğitici Öğrenme:** Bu yöntemde, dışardan bir eğitici sinir ağına müdahalesi söz konusudur. Eğitici, sinir ağının ilgili giriş için üretmesi gereken sonucu sinir ağı sistemine verir. Yani yapay sinir ağına giriş/çıkış ikilisinden oluşan örnekler sunulur. Bu ikili, ağın öğrenmesi gereken özellikleri temsil eder. Ağın giriş kısmını alır ve o anki bağlantı ağırlıklarının temsil ettiği bilgi ile bir çıkış oluşturur. Bu çıkış, olması gereken çıktı ile mukayese edilir ve aradaki hata tekrar ağa aktararak ağırlıklar bu hatayı azaltacak şekilde değiştirilirler.
- **Eğitici Öğrenme:** Bu durumda hiç bir eğiticiye ihtiyaç yoktur. Bu nedenle çoğu zaman buna kendi kendine organize olma (self-organized learning) da denilmektedir. Ağ, kendine gösterilen örnekleri alır ve belli bir kritere göre sınıflandırır. Bu kriter önceden bilinmeyebilir. Ağ, kendi öğrenme kriterlerini kendisi oluşturmaktadır.
- **Takviyeli Öğrenme:** Bu yöntemde de yine eğiticiye ihtiyaç vardır. Yukarıdaki yöntemden farkı ise, bu durumda eğitici sinir ağının, ağın üretmesi gereken sonuç yerine, onun ürettiği sonucun sadece doğru veya yanlış olduğunu söylemesidir. Bu ise ağa bir takviye sinyalinin gönderilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntem, ilgili örnek için beklenen çıktının oluşturulamadığı durumlarda çok faydalıdır.

Öğrenme işleminin, başlangıçtaki rasgele seçilmiş ağırlıkların, belirli bir kurala göre değiştirilmesine dayandığı belirtilmişti. Bu öğrenme kuralların ikisi aşağıda yer almaktadır. Bu algoritmalarda, $w_j = [w_{j1} \ w_{j2} \ \dots \ w_{jp}]$ vektörü ağıdaki i . hücreye gelen n tane girişin ağırlık

katsayılarını, $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ vektörü ağa gelen n tane girişi, y_j ve d_j 'de sırasıyla i . hücrenin hesaplanan ve istenen çıkışı temsil etmektedirler.

- **Delta Kuralı (Eğimdüşme) Öğrenme Algoritması:** Eğimdüşme (gradient descent) öğrenme algoritması veya “delta kuralı” öğrenme algoritması, sadece türetilbilir fonksiyonlara sahip olan ağlara uygulanabilmektedir. Eğiticili bir öğrenme algoritmasıdır, w değişimi hatanın eğiminin tersi yönündedir. Böylece, ağırlıkların minimum olduğu yere doğru hareket edeceklerdir. k . örnek için, ağ çıkışı ile arzu edilen çıkış arasındaki fark (hata)’a göre yeni ağırlık değerleri,

$$w_j(k+1) = w_j(k) - \alpha \cdot \frac{\partial E(k)}{\partial w_j(k)} \quad (8.6)$$

ile elde edilir. $E(k)$, hata fonksiyonunu temsil etmektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$E(k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 \quad (8.7)$$

ağ çıkışı, hata fonksiyonunda yerine yazılırsa,

$$E(k) = \frac{1}{2} [d(k) - f(w(k).x(k))]^2 \quad (8.8)$$

olur. Buradan yeni ağırlıkları bulmak için, hata fonksiyonunun ağırlıklara göre kısmi türevleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_i(k)} = -[d(k) - f(w(k).x(k))] \cdot \frac{\partial f(w(k).x(k))}{\partial (w(k).x(k))} \cdot x_i(k) \quad (8.9)$$

Bilinen geriye yayılma algoritmasının esası da, bu öğrenme kuralına dayanmaktadır.

- **Geriye Yayılım Öğrenme Algoritması:** İleri beslemeli ağ yapılarında kullanılan bir algoritmadır. İleri beslemeli bir yapay sinir ağı için arzu edilen çıkış ile ağ çıkışı arasındaki fark (hata), çıkıştan girişe doğru yansıtılır. Bunun için, k anındaki hatanın

ağın her bir ağırlığa göre eğimi hesaplanarak, ilgili ağırlığa uygulanacak değişim miktarı bulunur.

8.1.6. YSA'nın temel özellikleri

YSA'yı hem popüler yapan, hem de geleneksel bilgi işleme metotlarından ayıran özellikleri vardır. YSA'nın bir takım özellikleri, her ne kadar ilgili problemin yapısına ve kullanılan sinir ağı modeline bağlı olsa da, genel özellikleri aşağıdaki gibi verilebilir [126].

- **Öğrenme:** Daha önce söz edildiği gibi, YSA, olaylar hakkındaki ilişkiyi belirli bir algoritmaya dayanarak çözmek yerine, o ilişkiyi gösteren örnekleri incelemek suretiyle çözümler üretmeyi sağlar. Burada, ilgili olay ile alakalı sinir ağına örneklerden başka hiç bir ön bilginin verilmemiş olması dikkat çekicidir. Ağ, kendisine gösterilen örnekleri tekrar tekrar inceleyerek aradaki ilişkiyi kavramaya çalışır. Her yeni örnek, ağın sahip olduğu bilgiye bir yenisini ekler ve bu işlem tekrar ettikçe ilgili problem hakkında bazı genellemeler yapılır.
- **Genelleme:** Alışagelmiş bilgisayarların bir karakteristiği, istenen çıkışı üretmek için, tam olarak doğru girişlere ihtiyaç göstermeleridir. Öte yandan YSA, girişlerinde değişimler olsa bile doğru çıkışı üretebilirler. Mesela, basılı harfleri tanımak için eğitilmiş bir sistem, gürültüden dolayı giriş karakterlerinin bozulması halinde bile doğru olarak çalışmaktadır. Yani sistem, daha önce o tipten hiç bir şey görmemiş olmasına rağmen, insanlar gibi tamam olmayan veya kısmen hatalı girişlerle bile, harfleri tanıyabilmektedir. Çalışmalar, insanların çoğunun bir metindeki harflerin yarısından fazlası silinmiş olsa bile, o metni okuyabildiklerini göstermiştir [128].

YSA, kendilerine gösterilen bir şekli daha önce öğrendikleri ile mukayese ederek ve aradaki benzerlikleri ortaya koyarak, belirli sınıflara ayırma özelliklerine sahiptir.

YSA tam doğru olmayan bir eğitime kümesinden, tam doğruyu çıkarabilir. Ses tanımak için eğitilmiş bir yapay sinir ağına, gürültü tarafından bozulmuş ses verilebilir. Buna rağmen eğitilden sonra, sistem girişi bozuk ses olmasına rağmen, çıkışta ses mükemmel bir şekilde oluşturulabilir. Yani sistem, eğitim kümesinin özünü çıkarıp saklamıştır. Böylece, eksik veya gürültülü girişlere karşı uygun şekilde cevap verebilmektedir.

- **Hata Toleransı:** Verilerde eğer bir eksiklik söz konusu olursa, geleneksel yöntemler yeterli olmaz. Daha önce belirtildiği üzere, iyi eğitilmiş ve genelleme kapasitesi yüksek bir sinir ağı, kendisine takdim edilen veriler eksik olsa da karar verme işlemine devam eder. Aynı şekilde, yapay sinir ağı üzerinde birtakım problemler ve bozukluklar olabilir. Geleneksel sistemlerin tersine YSA, bu durumda da çalışmalarına devam eder. Verilerdeki eksiklik veya yapay sinir ağındaki yapısal bozukluk arttıkça yapay sinir ağının performansı yavaş yavaş azalmaya başlar. Fakat sistem fonksiyonunu tamamen durdurmaz ve mutlaka bir sonuç üretilir. Bu özellikler yapay sinir ağının yapısından kaynaklanmaktadır. Çünkü ağın sahip olduğu bilgi, ağ üzerindeki hücrelerin birbiri ile olan bağlantıları üzerine dağıtılmıştır. Zaten böyle bir durumda tek bir bağlantı ve onun üzerindeki bilgi, başlı başına hiçbir zaman bir anlam ifade etmez. Ancak, bir grup halinde ve tam olarak bağlantıların birlikte düşünülmesi sonucu anlamlı bilgiler üretilir. Bundan dolayı birkaç bağlantının etkisiz hale gelmesi, sonucu ya etkilemez veya performansını yavaş yavaş düşürür. Yapay sinir ağı sahip olduğu diğer bağlantılar nedeniyle işlevine devam eder. Geleneksel sistemlerin ardışık çalışmalarından dolayı, sistemdeki en küçük bir hatanın veya bozulmanın ulaşabileceği boyutlar düşünülürse bu özelliğin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkar.
- **Hız:** Bilgi işleme hızı, bilgisayar teknolojisinde önemli bir yer teşkil eder. Sistemlerin her geçen gün biraz daha karmaşık olduğu, dolayısı ile daha fazla hacimde veriyi daha verimli bir şekilde işleme gerekliliği, yeni yazılım/donanım sistemlerinin zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Diğer yandan insan beyni oldukça fazla bilgiyi gerçek zamanlı olarak oldukça hızlı bir şekilde işleyebilmektedir. YSA'nın da, yine birbirlerine bağlı ve paralel işlem elemanlarından oluşmasından dolayı hızlı işleyebilme özelliği bu ağlara özellikle endüstriyel hayatta çok önemli olan gerçek zamanlı çalışma kabiliyeti kazandırır.

8.1.7. YSA'nın avantajları

Sinir ağları sahip oldukları avantajlardan dolayı mevcut klasik tek işlemli çözümlerle çalışmanın zor olduğu pek çok konuda uygulanmaktadır. Aşağıda bu avantajlardan bazıları verilmiştir.

1. Öncelikle ilgili faktörleri belirlemeye daha az ihtiyaç duyarlar. Genelde ilk yapılacak iş ilişkili faktörlerin istatistiksel modelini çıkarmaktır. Sinir ağları, veri sunma ve ilgili verileri saptama üstünlüğüne sahiptir.

2. Sinir ağıları genelde yüzlerce faktöre sahiptir; fakat bütün giriş faktörlerinin kabul edilen etkisi, modelin herhangi bir istatistiksel modelden çok daha kesin olarak zor problemlere cevap bulmasını sağlar.
3. İstatistiksel modeller, dolaylı yoldan ilişkileri öğrenme yoluna gider. Hâlbuki sinir ağıları yaklaşımıyla, problemi doğrudan modellemek mümkündür.
4. Giriş faktörlerinin çok olmasından ve verideki bozucu etkiden veya donanımın hatasından kaynaklanan sorunlar azdır.
5. Sinir ağ modellerinde bulunan her sinapsis kendi işlemine sahiptir. Aynı katmanda bulunanlar arasında zaman bağımlılığı olmayıp, tamamen senkron olarak çalışırlar.

8.2. Uyarlamalı Bulanık Sinirsel Ağlar (UBSA)

Bulanık mantık, sinir ağıları, genetik algoritmalar ve uzman sistemler gibi bütün yapay zeka tekniklerinin her birinin kendisine özgü yetenekleri bulunmaktadır. Örneğin YSA ile öğrenme, örnekleri tanımlamada iyi iken kararların nasıl alındığını konusunda iyi değildir. Bulanık mantık yaklaşımı karar almada çok iyi sonuçlar verir, fakat karar alma sürecindeki kural oluşturmayı kendiliğinden gerçekleştiremez. Sinirsel bulanık mantık yaklaşımı, YSA'nın öğrenme yeteneği, en uygunu bulma ve bağlantılı yapılar özelliği, bulanık mantığın ise insan gibi karar verme ve uzman bilgisi sağlama kolaylığı gibi üstünlüklerinin birleştirilmesi fikrine dayanmaktadır. Bu yolla, bulanık denetim sistemlerine, sinir ağlarının öğrenme ve hesaplama gücü verilebilirken, sinir ağlarına da bulanık denetimin insan gibi karar verme ve uzman bilgisi sağlama yeteneği kazandırılmaktadır. Modern sinirsel bulanık sistemler genellikle ileri beslemeli çok katmanlıdır. Son yıllarda birçok araştırmacı tarafından yoğun olarak ANFIS, FALCON, FuNe, RuleNet, GARIC, NEFCLASS, NEFCON, NEFPROX diye adlandırılan sinirsel bulanık sistemler kullanılmaktadır [131].

Bulanık çıkarım sistemleri ve çok katmanlı algılayıcılar, uyarlamalı ağların çok genel hesaplama çalışmalarının özel örnekleridir. Her iki örnek de uyarlamalı ağın geriye yayılma öğrenme yeteneğini almıştır. UBSA, uyarlamalı ağların işlevsel olarak bulanık çıkarım sistemine eşdeğer olan bir sınıftır. Açık olarak uyarlamalı ağlara dayanan bulanık çıkarım sistemi veya uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi anlamına gelen UBSA (ANFIS) ismi, Adaptive Network-based Fuzzy Inference System veya Adaptive Neuro Fuzzy Inference System olan özgün adının baş harflerinden oluşmuştur. Aynı zamanda bazı kaynaklarda ANFIS, Takagi, Sugeno, Kant (TSK) bulanık kuralları ile sinirsel bulanık denetleyici olarak geçmektedir. Aynı şekilde karma sinir ağıları olarak da anılmaktadır [131].

UBSA denetleyicilerin bazı önemli özellikleri tanımlanabilir:

1. Öğrenme yeteneği,
2. Paralel işlem,
3. Yapılandırılmış bilgi temsili,
4. Diğer denetim tasarım yöntemleriyle daha iyi bütünleşme.

Çok katmanlı algılayıcı, 1. ve 2. özelliklere sahiptir fakat 3. ve 4. özelliklere sahip değildir.

UBSA'nın yapısındaki bulanık çıkarım sisteminin mimarisinin kolaylıkla anlatılabilmesi için x ve y olmak üzere iki girişi ve f gibi bir çıkışı olduğu kabul edilirse, birinci derece Sugeno bulanık modeli için iki bulanık “EĞER-O HALDE” kuralı Eşitlik (8.10)'daki gibi olur.

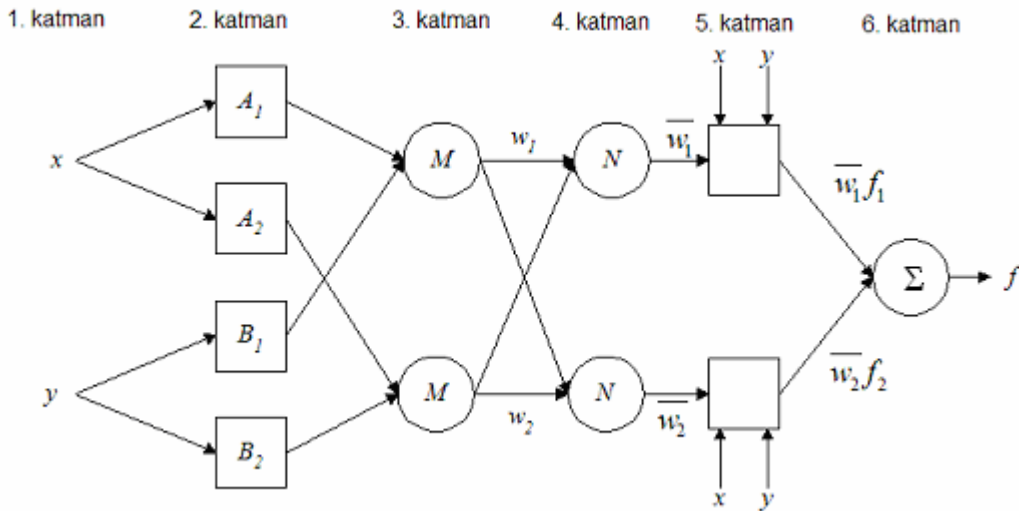
Kural 1: EĞER $x = A_1$ ve $y = B_1$ O HALDE $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2: EĞER $x = A_2$ ve $y = B_2$ O HALDE $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ (8.10)

Eşitlikte $i = 1, 2$ için, x ve y giriş değişkenlerini, f_i çıkış değişkenini, A_i ve B_i bulanık kümeleri, $p_i, q_i, r_i \in R$ olmak üzere sonuç değişkenlerini gösterirler.

8.2.1. UBSA mimarisi

Şekil 8.6'da iki girişli ve iki kurallı Sugeno tip bulanık çıkarım yöntemine eşdeğer olan UBSA mimarisi görülmektedir. UBSA mimarisi içindeki her katmana ait düğüm işlevleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.6. İki girişli ve iki kurallı Sugeno tip bulanık çıkarıma eşdeğer UBSA mimarisi

1. Katman: Bu kademedeki her düğüm, giriş sinyallerin diğer katmanlara aktarıldığı giriş düğümleridir. Bu düğümde herhangi bir toplam ya da etkinlik işlevi kullanılmaktadır.

2. Katman: Bu katmandaki her düğüm için A_i ve B_i 'ler bulanık kümeyi ifade ederler. Bu katmandaki düğümlerin çıkışı giriş örneklerine ve kullanılan üyelik işlevine bağlı olan üyelik dereceleridir. Bu düğümlerden elde edilen üyelik dereceleri veya düğüm çıkışları Eş.(8.11)'deki gibidir.

$$\begin{aligned} O_i^1 &= \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2 \\ O_i^1 &= \mu_{B_{i-2}}(y), \quad i = 3, 4 \end{aligned} \quad (8.11)$$

Eş. (8.11)'de görüldüğü gibi iki farklı düğüm çıkışı yazılmıştır. Bunun nedeni ağın x ve y gibi iki farklı girişe sahip olmasıdır. Bu katmanda her iki giriş için toplam 4 düğüm vardır. Her bir düğümde üyelik fonksiyonu olarak en çoğu 1 ve en azı 0 olan çan eğrisi üyelik fonksiyonları kullanılır ve sonuç işlevi Eş. (8.12)'de verilmiştir.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right\}^{b_i}} \quad (8.12)$$

burada c_i ve a_i çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonun sırasıyla orta noktasını (mean) ve standart sapmasını (standard deviation) gösterir. Bu değişkenler ağ eğitilirken ayarlanır.

3. Katman: Bu katmandaki her düğüm, M ile etiketlenmiştir ve giren tüm işaretlerin çarpımını gösterir. Düğüm çıkışı Eş. (8.13)'deki gibi ifade edilebilir.

$$O_i^3 = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (8.13)$$

Her düğümün çıkışı bir kuralın eşikleme seviyesini temsil eder. Genelleştirilmiş bulanık VE'yi (AND) yerine getiren t-norm operatörlerden herhangi biri, bu katmandaki düğümler için düğüm işlevi olarak kullanılabilir.

4. Katman: Bu katmandaki her düğüm N ile etiketlenmiştir ve burada, bir kuralın normalleştirilmiş eşikleme seviyesi hesaplanır. Bu, Eş. (8.14)'de görüldüğü gibi, i . düğüm için, i . kuralın eşikleme seviyesinin, bütün kuralların eşikleme seviyelerinin toplamına eşittir.

$$O_i^4 = \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (8.14)$$

5. Katman: Bu katmandaki her i düğümü, düğüm işlevi ile uyarlamalı bir düğümdür. Her i düğümü, sonuç ağırlıkları değerlerini hesaplar. Düğüm çıkış işlevi Eş. (8.15)'deki gibi yazılabilir.

$$O_i^5 = \overline{w_i} f_i = w_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (8.15)$$

burada, $\overline{w_i}$, 4. katmanın çıkışıdır ve normalleştirilmiş eşikleme seviyesidir. Aynı zamanda (p_i, q_i, r_i) ayar edilebilmesi için gerekli olan, ayar değişken kümesidir. Bu katmandaki değişkenler sonuç değişkenlere karşılık gelir.

6. Katman: Bu katmanda sadece bir düğüm vardır ve Σ ile etiketlenmiştir. Burada, 5. Katman çıkışından alınan sinyaller toplanır ve elde edilen sonuç sistemin gerçek çıkışı f değerini verir. Ağın gerçek çıkışı Eş. (8.16)'da verilmiştir.

$$O_i^6 = \sum_{i=1}^2 \overline{w_i} f_i = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i f_i}{w_1 + w_2} \quad (8.16)$$

Böylece Sugeno tip bulanık çıkarım modeline işlevsel olarak eşdeğer olan, örnek UBSA yapısı tanımlanmıştır. Ağın yapısı tamamen sabit değildir. Ağın oluşturulması ve düğüm işlevlerinin görevlerine göre ayrılması, her katmandaki her bir düğümün sağladıklarına ve modüler işlevselliğine göre keyfi olarak seçilebilir [131].

Sugeno tip UBSA'dan Tsukamoto UBSA'a kolaylıkla geçilebilir. Genellikle yaygın olarak da bu iki tip kullanılır. Mamdani tip bulanık çıkarıma karşılık gelen UBSA için, Max-Min kompozisyonu ve sonuç çıkış için ağırlık merkezi durulama yöntemi ile elde edilebilir. Fakat bu Sugeno veya Tsukamoto tip UBSA'a göre çok karmaşık ve zordur. Ayrıca öğrenme yeteneğine ve yaklaşım gücüne önemli bir katkı sağlamamaktadır [131].

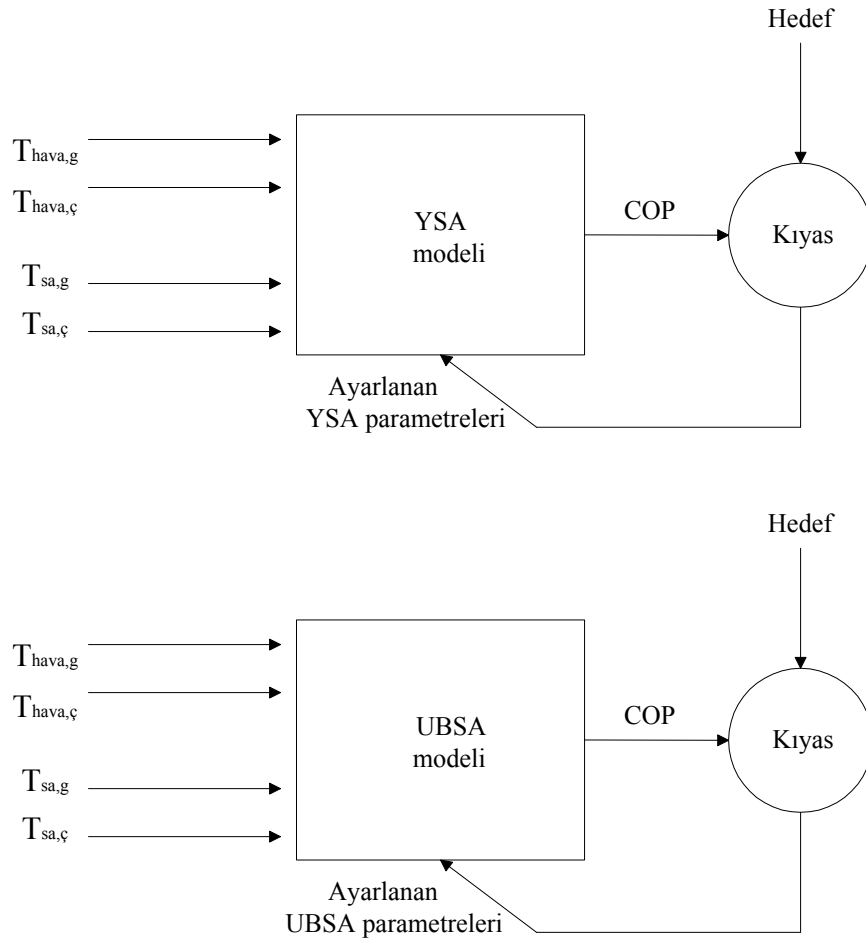
Bütün sonuç değişkenler bir vektör olarak $(p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2)^T$ şeklinde düzenlenir ve Eş. (8.17)'deki eşitlik ile gösterilebilir.

$$f = (\overline{w_1 x})p_1 + (\overline{w_1 y})q_1 + (\overline{w_1})r_1 + (\overline{w_2 x})p_2 + (\overline{w_2 y})q_2 + (\overline{w_2})r_2 \quad (8.17)$$

Sonuç ve üyelik fonksiyonlarına ait değişkenlerin ayarlanmasında geri yayımlı öğrenme algoritması kullanılabilir [131].

8.3. YSA ve UBSA ile TKIP Sisteminin Performans Tahmini

Yapılan çalışmada, MATLAB 6.5 programı kullanılmış olup, hem soğutma modu hem de ısıtma modu için deneylerden alınan veriler kullanılmıştır. YSA yapısı olarak 4 adet giriş, 1 adet çıkış'lı çok katmanlı bir sinir ağı algılayıcısı (MLP) modeli kullanılmıştır. Şekil 8.7'de bu yapılar verilmiştir.



Şekil 8.7. YSA ve UBSA'da kullanılan blok diyagramların görünümü

YSA modellemesinde üç farklı öğrenme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar [132-134];

- Levenberg–Marquardt (LM),
- Scaled Conjugate Gradient (SCG),
- Pola-Ribiere Conjugate Gradient (CGP)'dir.

Bu algoritmalar kullanılarak ve ara katman sayısı değiştirilerek deneme yanılma yoluyla en iyi çözümler elde edilmeye çalışılmıştır.

8.3.1. Soğutma modu için YSA ve UBSA ile performans tahmini

Soğutma modu için 4 adet giriş (su antifriz karışımı sıcaklıkları $T_{sa,g}$ ve $T_{sa,\phi}$, buharlaştırıcıya giren ve buharlaştırıcıdan çıkan hava sıcaklıkları $T_{hava,g}$ ve $T_{hava,\phi}$) ve 1 adet çıkış (sistem performansı, COP) verisi kullanılmıştır. Toplam 87 adet data kullanılmıştır. Bu datalar ilk önce karıştırılıp daha sonra 29'ar adet data ile üç gruba ayrılmıştır. İlk 29 X 2 =58 adet data eğitim için, daha sonraki 29 adet data da test için kullanılmıştır. Girdi değerleri (0, 1) aralığında normalize edilmiştir. Çıkış değeri normalize edilmemiştir.

Model değerlendirme kısmında değişik istatistiki metotlar kullanılmıştır. Bunlar, ortalama karekök (root-mean squared, RMS), çoklu saptama katsayısı (coefficient of multiple determinations, R^2) ve varyasyon katsayısı (coefficient of variation, cov)'dır. Bu istatistiki metotlar kullanılarak model değerlendirmede, gerçek değerlerle tahmin edilen değerler kıyaslanabilir. YSA ve UBSA modelleri için R^2 'nin 1'e yaklaştığı daha küçük RMS ve cov değerleri en iyi modeli verir.

Oluşan hata RMS değeriyle aşağıdaki gibi hesaplanır [135-136]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (y_{tah,m} - t_{ort,m})^2}{n}}, \quad (8.18)$$

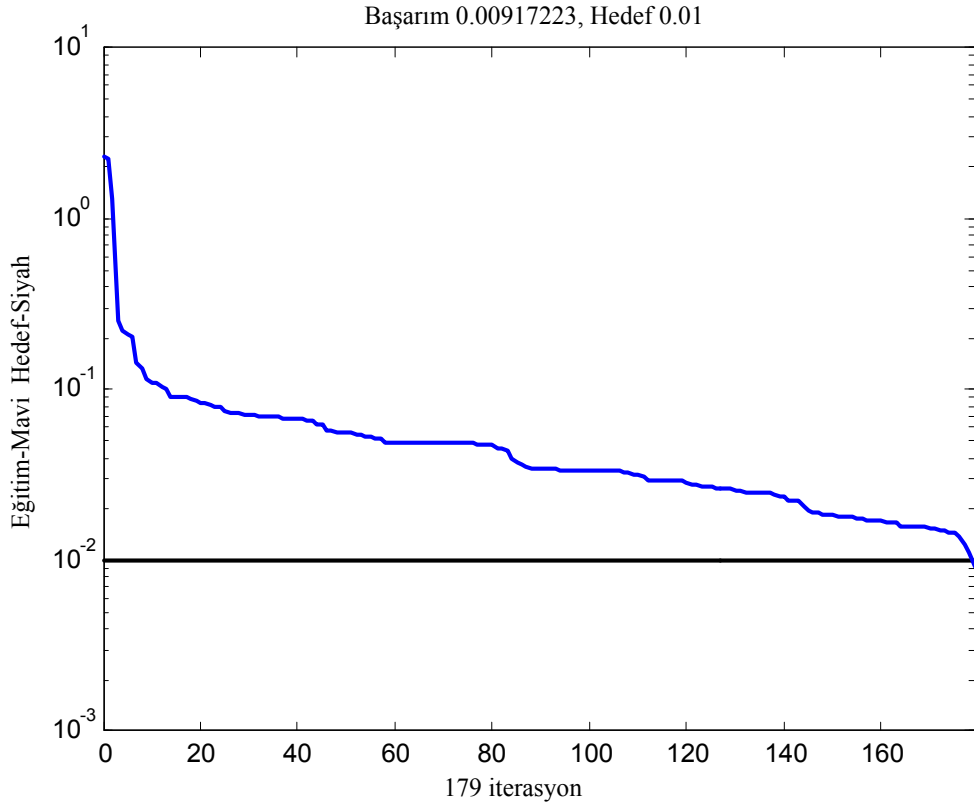
Ek olarak, R^2 ve cov değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (y_{tah,m} - t_{ort,m})^2}{\sum_{m=1}^n (t_{ort,m})^2} \quad (8.19)$$

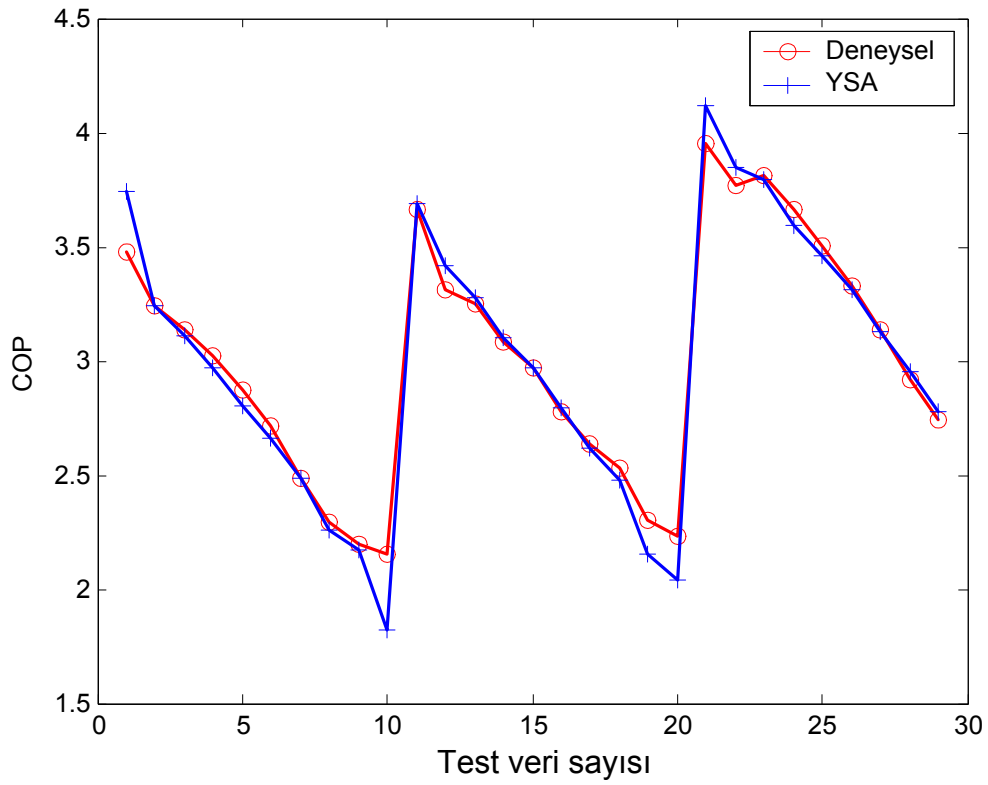
$$cov = \frac{RMS}{|\bar{t}_{ort,m}|} 100, \quad (8.20)$$

burada, n bağımsız data grubu içerisindeki örnek sayısını, $y_{tah,m}$ tahmini değerini, $t_{ort,m}$ m noktasındaki bir datanın ortalama değerini ve $\bar{t}_{ort,m}$ bütün ölçülmüş data noktalarındaki ortalama değeri gösterir.

Yaptığımız çalışmada, ara katman sayıları 6, 8 ve 10 olarak seçilmiştir. Optimum model parametrelerini belirlemek için UBSA'nın bulanık kural tabanı, farklı üyelik fonksiyonları ve üyelik fonksiyonlarının da farklı ara katman sayıları için kullanılmıştır. İlk önce YSA modelinde değişik algoritmalar denenmiştir. Bu algoritmalar CGP, LM ve SCG algoritmalarıdır. Bu algoritmalar içinde de üç farklı sayıda ara katman sayısı değiştirilerek aralarında en uygun çözüm bulunmuştur. Şekil 8.8'de CGP10 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 179 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşılmıştır. Bu modelin başarımı da 0.00917223'dür. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için yani üç günlük data için karşılaştırma yapılmıştır. CGP6, CGP8 ve CGP10 algoritmaları içinde en iyi çözüm CGP10 algoritmasında yakalandığı için burada CGP10 çözümü verilmiştir. R^2 değeri 0.9989 olup RMS ve cov değerleri de en küçük değerlerdedir.

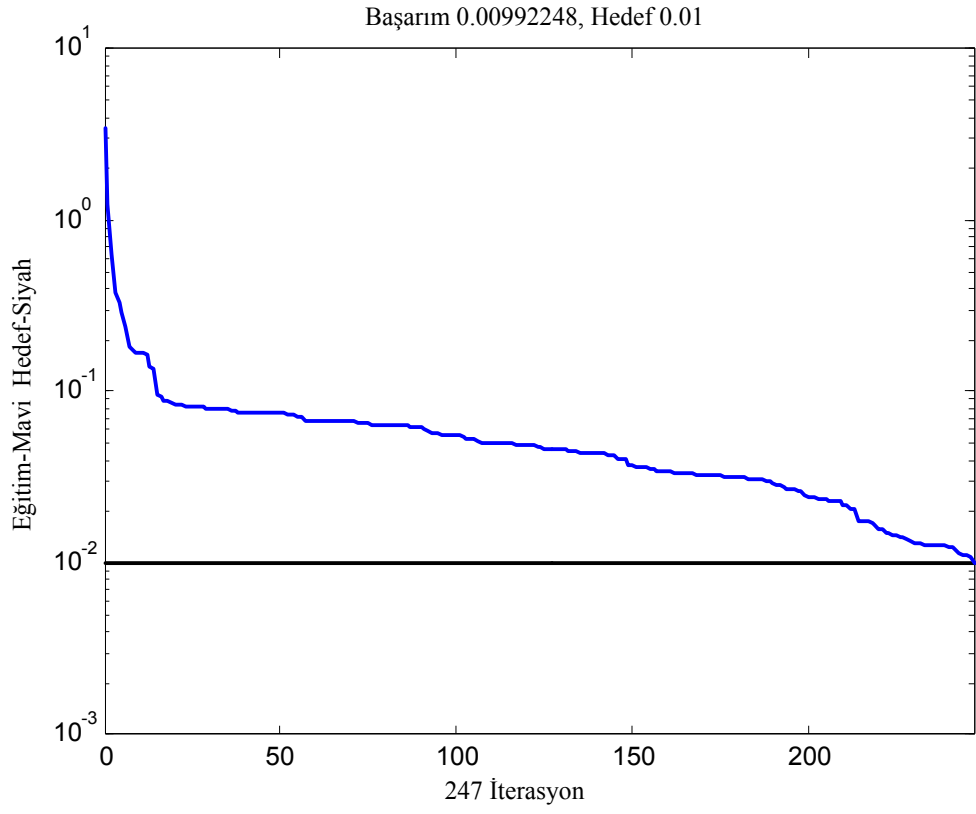


Şekil 8.8. CGP10 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi

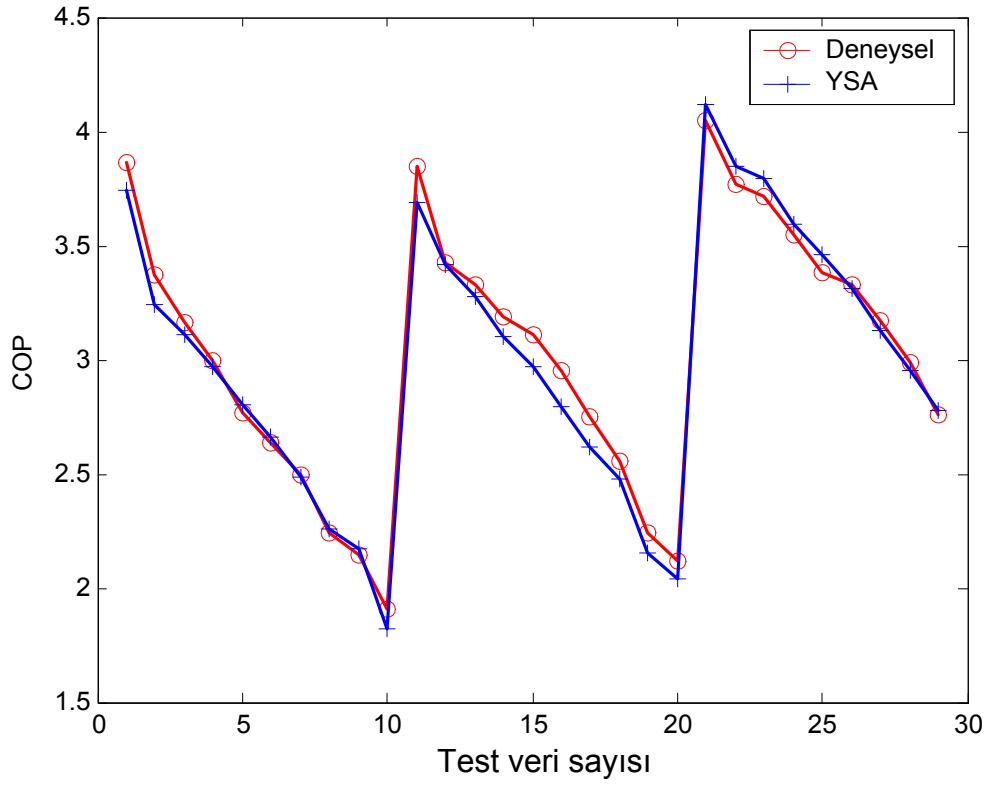


Şekil 8.9. CGP10 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Daha sonra SCG algoritması denenmiştir ve ara katman sayısı olarak en iyi değer 6 olarak bulunmuştur. SCG6 algoritmasında R^2 değeri 0.9993 olarak bulunup, RMS ve cov değerleri de en küçük değerlere ulaşmıştır. Şekil 8.10'da SCG6 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 247 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşılmıştır. Bu modelin başarımı da 0.00992248'dir. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.11'de verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için karşılaştırma yapılmıştır.



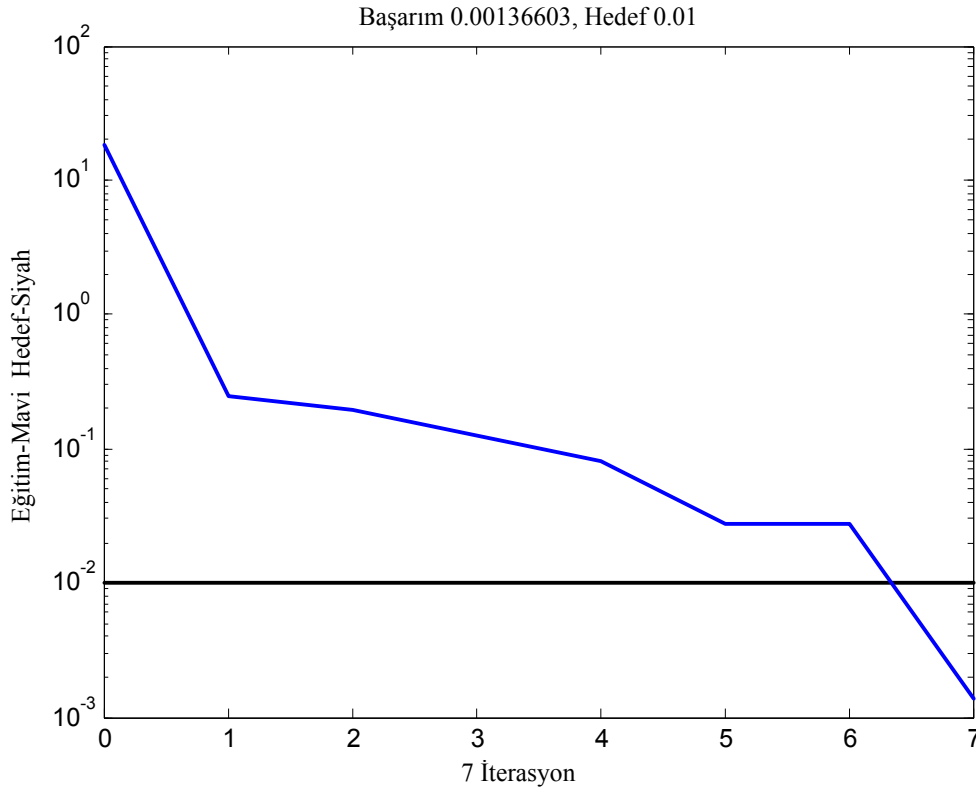
Şekil 8.10. SCG6 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi



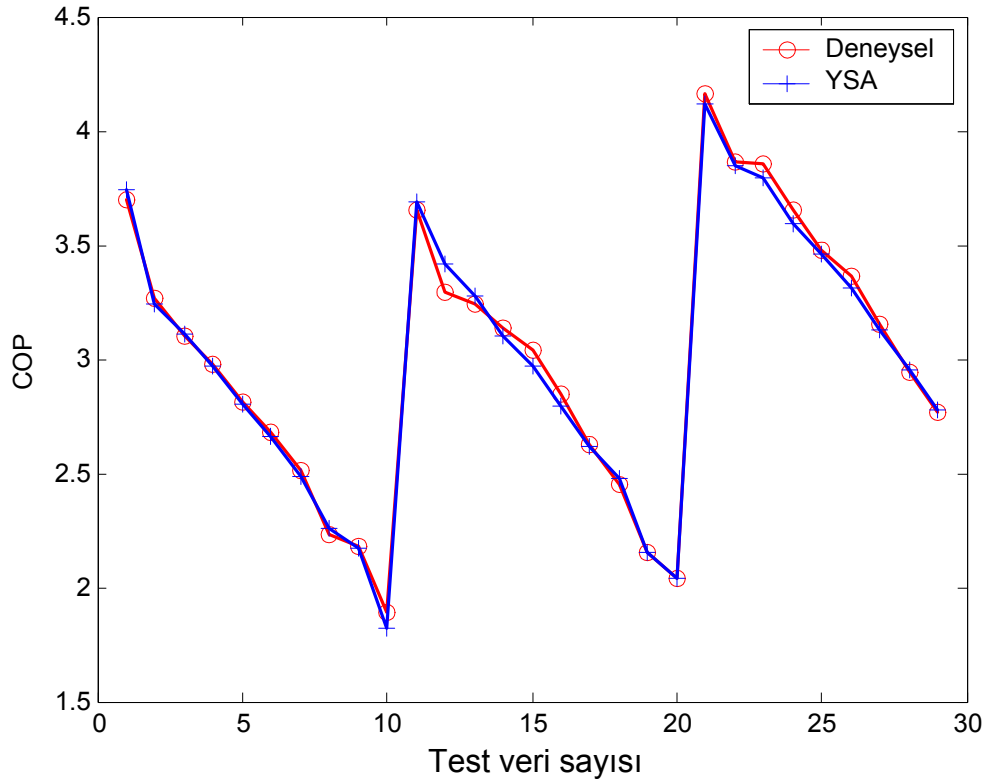
Şekil 8.11. SCG6 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Soğutma dataları son olarak LM algoritması için de denenmiştir ve ara katman sayısı olarak en iyi değer 8 olarak bulunmuştur. LM8 algoritmasında R^2 değeri 0.9998 olarak bulunup, RMS ve cov değerleri de en küçük değerlere ulaşmıştır. Şekil 8.12’de LM8 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 7 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri, hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşmıştır. Bu modelin başarımı da 0.00136603’dür. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.13’de verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için, yani üç günlük data için kıyaslanmıştır. Soğutma dataları ile yapılan çalışmada üç algoritma içinde en iyi değerlere LM8 algoritmasıyla ulaşılmıştır.

Tablo 8.1’de YSA modeli için elde edilen çözümlerin R^2 , RMS ve cov değerlerinin birlikte görünümü verilmiştir.



Şekil 8.12. LM8 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi

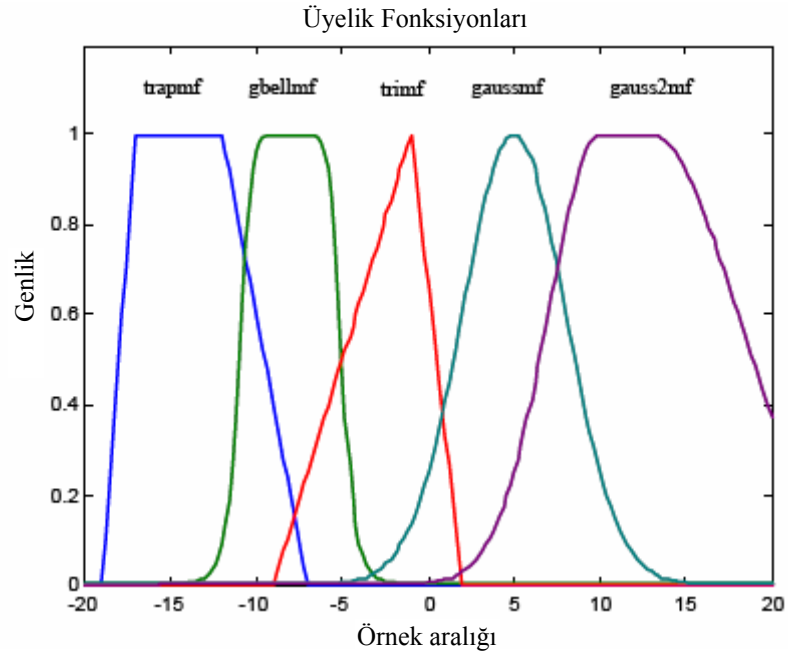


Şekil 8.13. LM8 algoritması TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

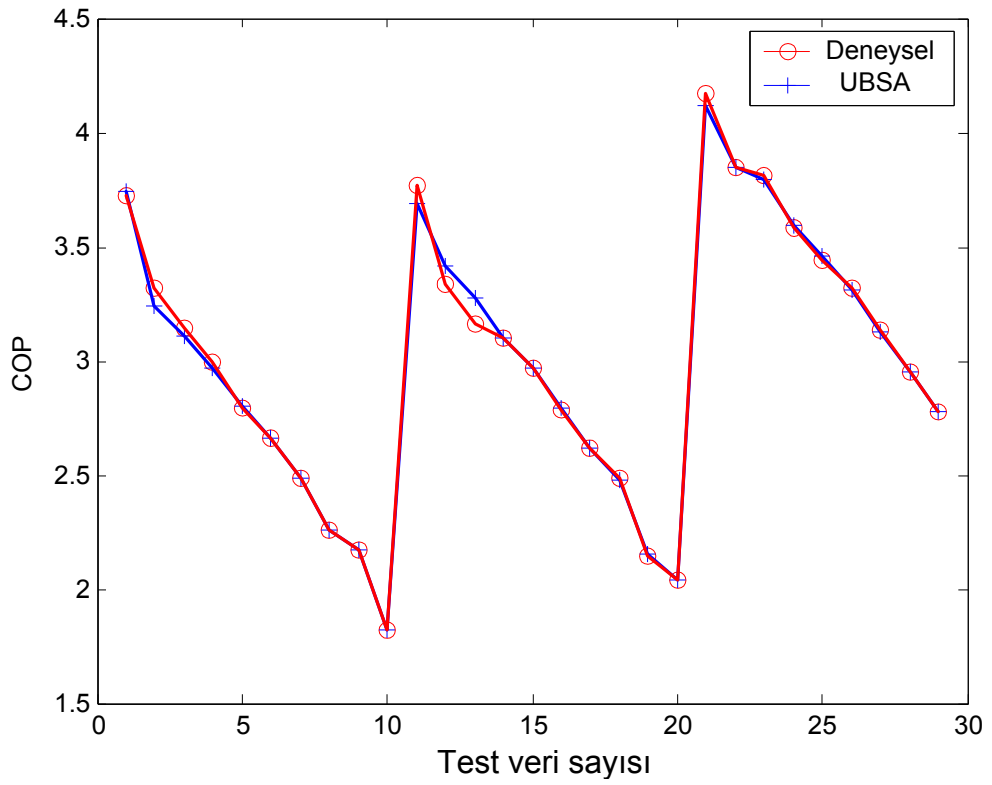
Tablo 8.1. YSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP'unun istatistiksel değerleri

Algoritmalar-nöronlar	RMS	cov	R ²
LM-6	0.0883	2.9783	0.9991
LM-8	0.0432	1.4373	0.9998
LM-10	0.0779	2.6169	0.9993
SCG-6	0.0815	2.6930	0.9993
SCG-8	0.1210	4.0562	0.9984
SCG-10	0.0870	2.9184	0.9992
CGP-6	0.1156	3.8405	0.9986
CGP-8	0.1544	5.1487	0.9974
CGP-10	0.1004	3.3638	0.9989

Soğutma dataları için son kısımda sistemin UBSA modeli oluşturulmuştur. Çözümlerde, UBSA için 5 adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının ve üyelik fonksiyon sayılarının model üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanılan üyelik fonksiyonları; gbell, gauss2, tri, gauss ve trap üyelik fonksiyonlarıdır. Bu üyelik fonksiyonlarının genlik değişimleri ile örnek aralığı değişimi Şekil 8.14'de verilmiştir. Çalışmada, en iyi fonksiyon sayısı 2 olarak bulunmuştur. Şekil 8.15'de en iyi çözüme ulaşılan gauss2 üyelik fonksiyonu için, deneysel değerler ile UBSA değerleri karşılaştırılmıştır..



Şekil 8.14. Söz konusu üyelik fonksiyonlarının örnek aralığı ile genlik değişimi



Şekil 8.15. Gauss2 üyelik fonksiyonu için TKIP sisteminin COP değerinin UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Kullanılan ANFIS bilgisi aşağıdaki gibidir;

- Düğüm sayısı: 55
- Lineer parametre sayısı: 80
- Non-lineer parametre sayısı: 32
- Toplam parametre sayısı: 112
- Eğitim için data çiftlerinin sayısı: 58
- Bulanık kural sayısı: 16

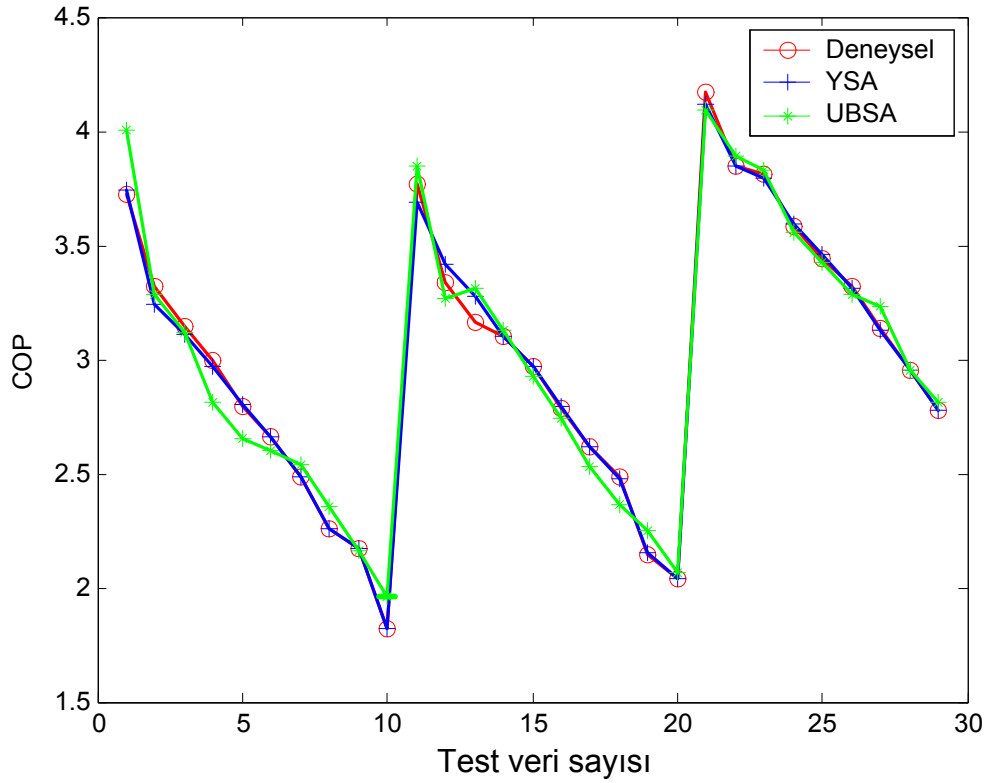
Tablo 8.2’de UBSA modeli için elde edilen çözümlerin R^2 , RMS ve cov değerlerinin birlikte görünümü verilmiştir.

Tablo 8.2. UBSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri

ÜF-ÜFS	RMS	cov	R^2
Gbell	0.0403	1.3468	0.9998
Gauss2	0.0370	1.2370	0.9999
Gauss	0.0538	1.7914	0.9997
Tri	0.1373	4.6429	0.9979
Trap	0.0521	1.7439	0.9997

ÜF: Üyelik fonksiyonu, ÜFS; Üyelik fonksiyon sayısı

Sonuç olarak, YSA ve UBSA’nın tahmini COP değerleri ile deneyden alınan gerçek COP değerlerinin değişimi aşağıdaki Şekil 8.16’da verilmiştir. Soğutma dataları için YSA modelinde en iyi algoritma olan LM8’deki R^2 değeri 0.9998 olarak hesaplandığı halde, UBSA için oluşturan model’de ise en iyi üyelik fonksiyonu gauss2 olup R^2 değeri 0.9999 olarak bulunmuştur.



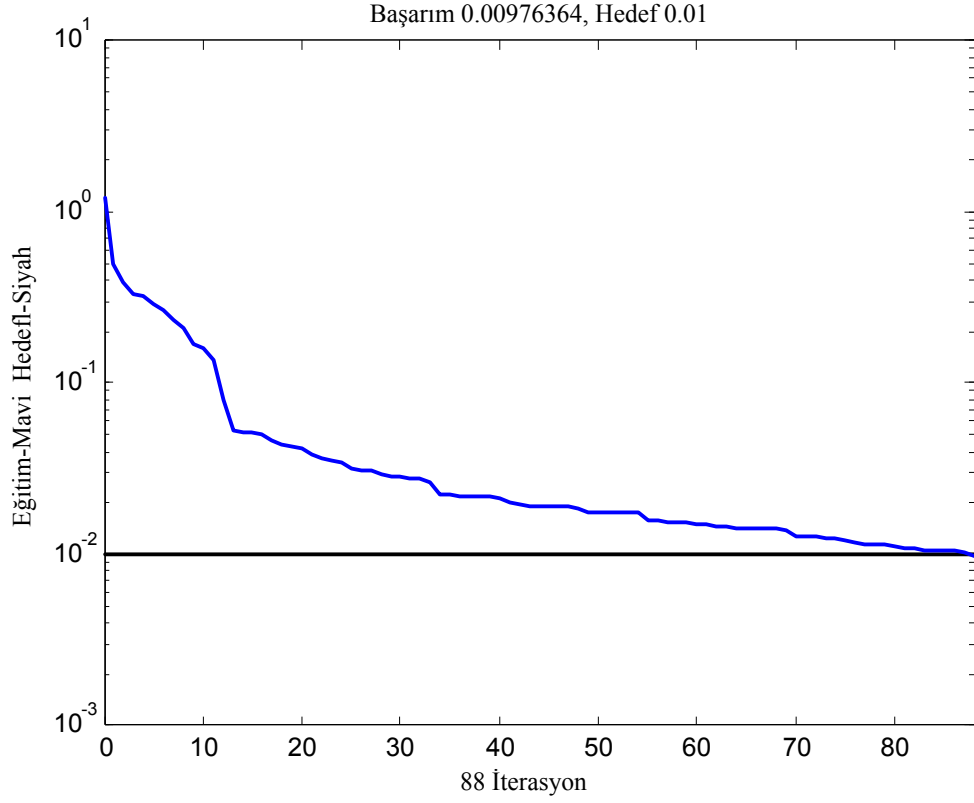
Şekil 8.16. TKIP sisteminin COP değerinin YSA, UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

8.3.2. Isıtma modu için YSA ve UBSA ile performans tahmini

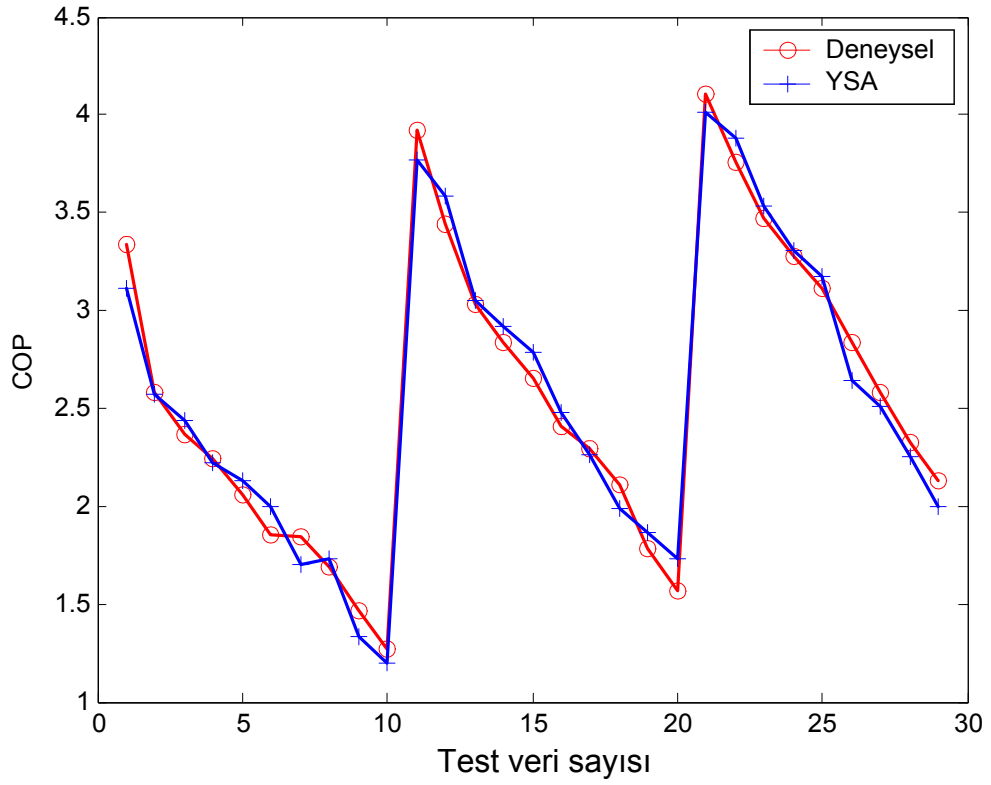
Isıtma modu için 4 adet giriş (su antifriz karışımı sıcaklıkları $T_{sa,g}$ ve $T_{sa,ç}$, yoğuşturucuya giren ve yoğuşturucudan çıkan hava sıcaklıkları $T_{hava,g}$ ve $T_{hava,ç}$) ve 1 adet çıkış (sistem performansı, COP) verisi kullanılmıştır. Toplam 87 adet data kullanılmıştır. Bu datalar ilk önce karıştırılıp daha sonra 29'ar adet data ile üç gruba ayrılmıştır. İlk $29 \times 2 = 58$ adet data eğitim için daha sonraki 29 adet data da test için kullanılmıştır. Girdi değerleri (0, 1) aralığında normalize edilmiştir. Çıkış değeri normalize edilmemiştir.

Bu çalışmada, ara katman sayıları 6, 8 ve 10 olarak seçilmiştir. Optimum model parametrelerini belirlemek için UBSA'nın bulanık kural tabanı, farklı üyelik fonksiyonları ve üyelik fonksiyonlarının da farklı ara katman sayıları için kullanılmıştır. Isıtma dataları için ilk önce YSA modelinde değişik algoritmalar denenmiştir. Bu algoritmalar CGP, LM ve SCG algoritmalarıdır. Bu algoritmalar içinde de üç farklı sayıda ara katman sayısı değiştirilerek aralarında en uygun çözüm bulunmuştur. Şekil 8.17'de CGP10 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 88 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri, hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşmıştır. Bu modelin başarımı, 0.00976364'dür. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki

kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.18’de verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için yani üç günlük data için karşılaştırma yapılmıştır. CGP6, CGP8 ve CGP10 algoritmaları içinde en iyi çözüm CGP10 algoritmasında yakalandığı için burada CGP10 çözümü verilmiştir. R^2 değeri 0.9989 olup RMS ve cov değerleri de en küçük değerlerdedir.

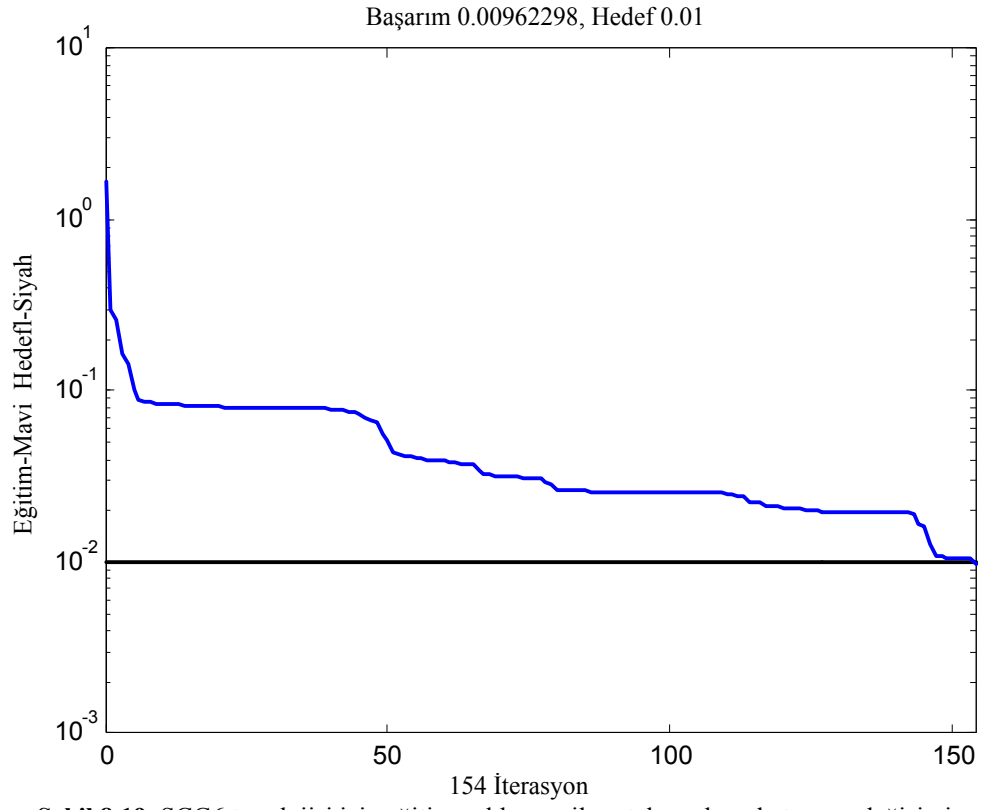


Şekil 8.17. CGP10 algoritması için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi

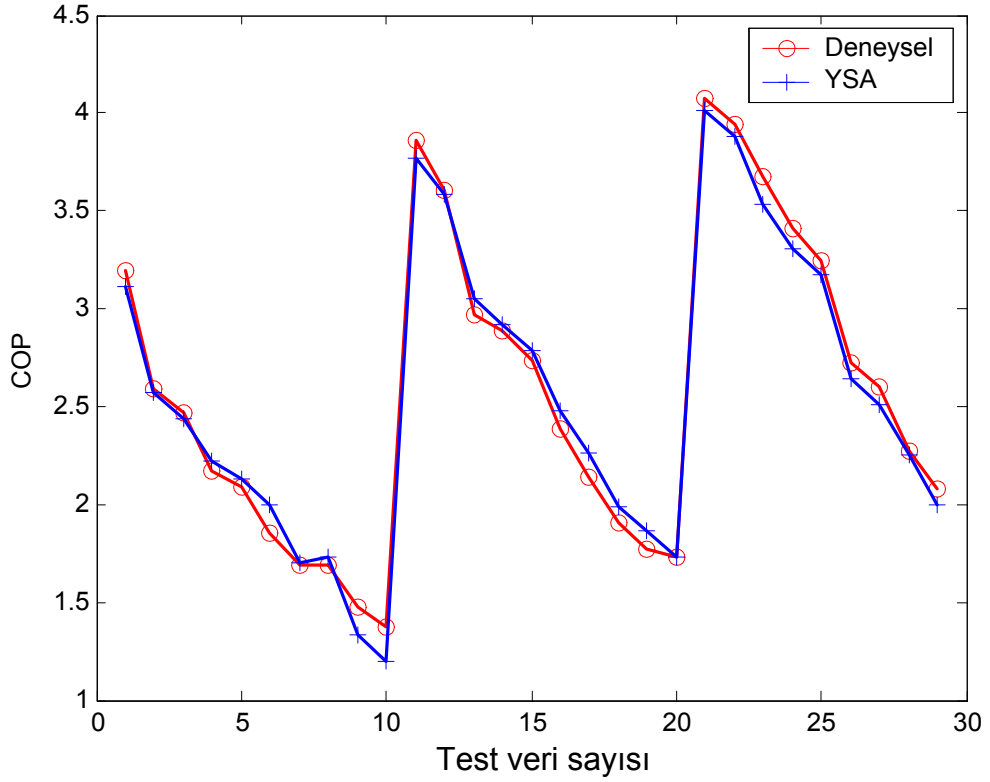


Şekil 8.18. CGP10 algoritması için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Daha sonra SCG algoritması denenmiştir ve ara katman sayısı olarak en iyi değer 6 olarak bulunmuştur. SCG6 algoritmasında R^2 değeri 0.9990 olarak bulunup, RMS ve cov değerleri de en küçük değerlere ulaşmıştır. Şekil 8.19’da SCG6 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 154 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri, hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşmıştır. Bu modelin başarımı, 0.00962298’dir. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.20’de verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için karşılaştırma yapılmıştır.



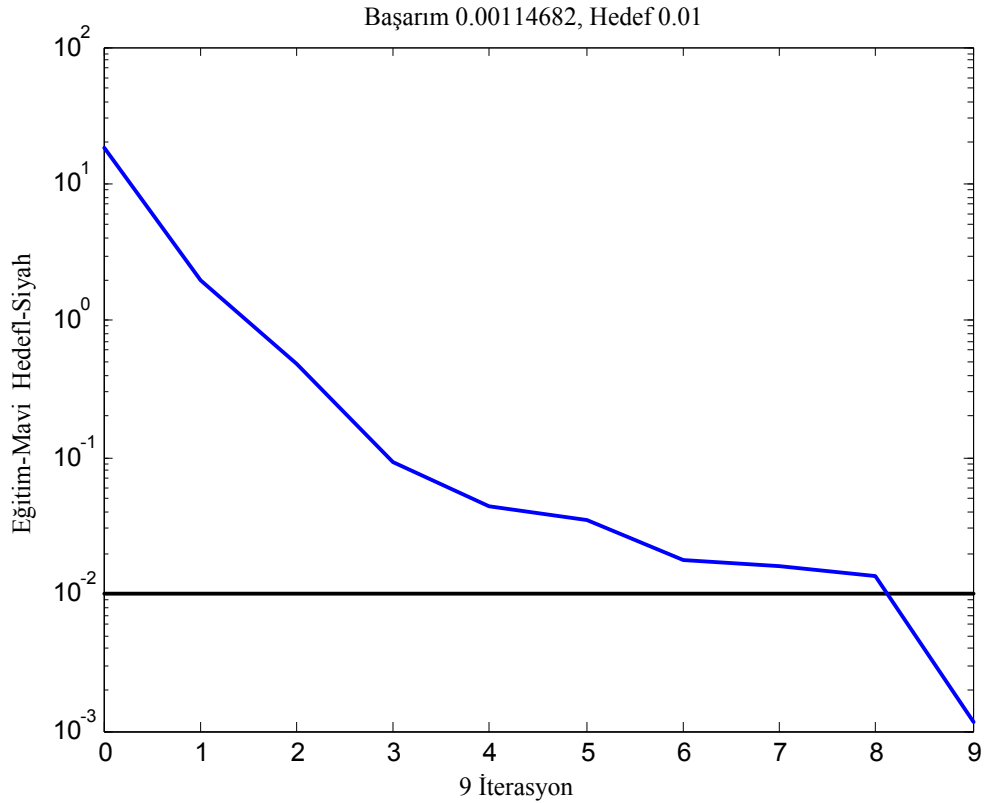
Şekil 8.19. SCG6 topolojisi için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi



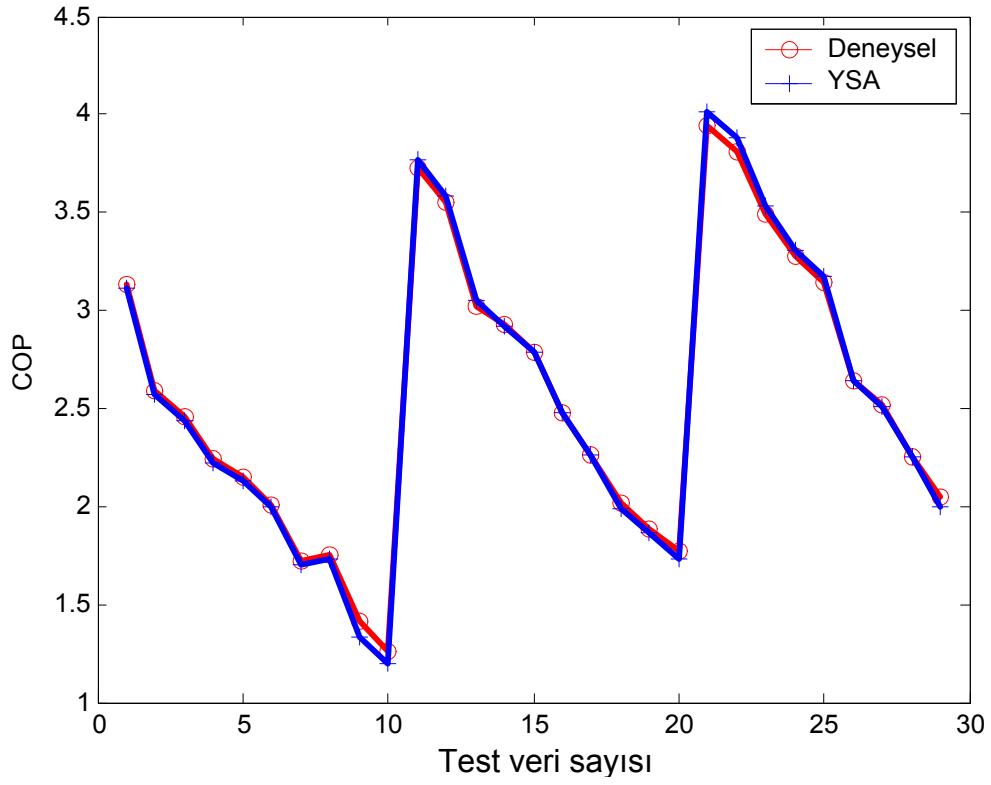
Şekil 8.20. SCG6 için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Isıtma dataları son olarak LM algoritması için denenmiştir ve ara katman sayısı olarak en iyi değer 8 olarak bulunmuştur. LM8 algoritmasında R^2 değeri 0.9998 olarak bulunup, RMS ve cov değerleri de en küçük değerlere ulaşmıştır. Şekil 8.21’de LM8 algoritması veya topolojisi için eğitim datalarının amaç değerine yakınsaması verilmiştir. Toplam 9 iterasyon sonucunda ortalama karesel hata (MSE) değeri, hedeflenen 10^{-2} değerine ulaşmıştır. Bu modelin başarımı da 0.00114682’dir. Bu çözüm sonucunda elde edilen deneysel ve YSA çözümü sonucundaki kıyaslamayı gösteren grafik de Şekil 8.22’de verilmiştir. Görüldüğü gibi üç ayrı 29 data için yani üç günlük data için kıyaslanmıştır. Soğutma dataları ile yapılan çalışmada üç algoritma içinde en iyi değerlere LM8 algoritma’sıyla ulaşılmıştır.

Tablo 8.3’de YSA modeli için elde edilen çözümlerin R^2 , RMS ve cov değerlerinin birlikte görünümü verilmiştir.



Şekil 8.21. LM8 topolojisi için eğitim yaklaşımı ile ortalama kare hatasının değişimi

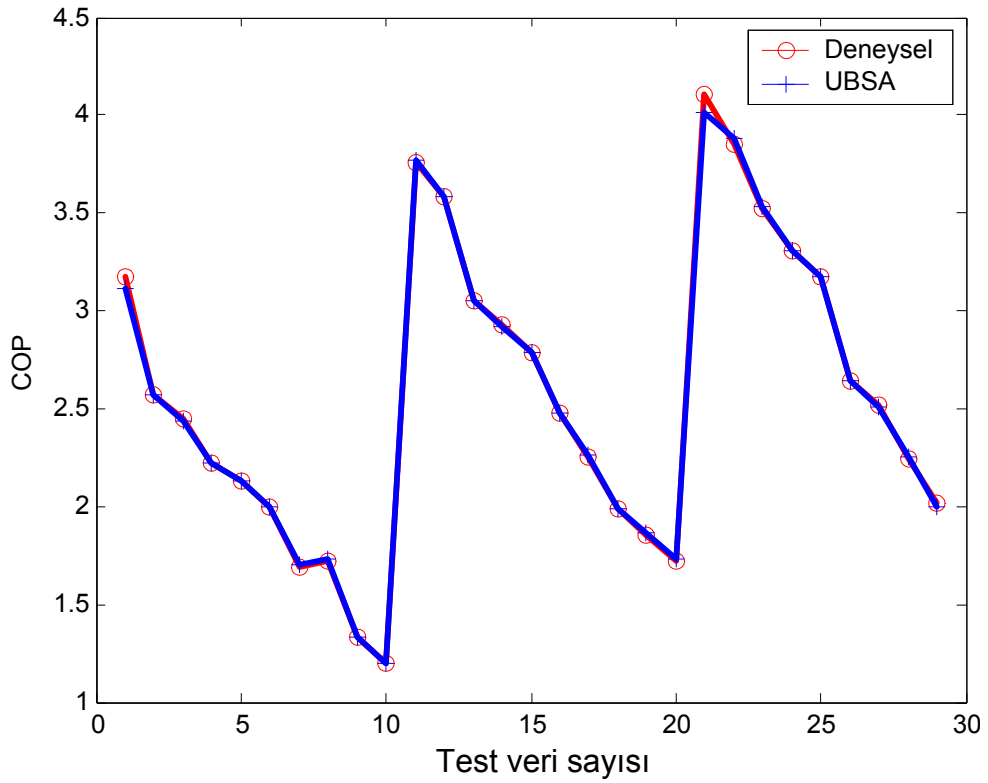


Şekil 8.22. LM8 için TKIP sisteminin COP değerinin YSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Tablo 8.3. YSA modelinde ısıtma modu için TKIP sistemi COP'unun istatistiksel değerleri

Algoritmalar-nöronlar	RMS	cov	R ²
LM-6	0.0855	3.3415	0.9990
LM-8	0.0344	1.3437	0.9998
LM-10	0.0904	3.5183	0.9988
SCG-6	0.0853	3.3151	0.9990
SCG-8	0.0899	3.5046	0.9989
SCG-10	0.0925	3.6398	0.9988
CGP-6	0.1147	4.4916	0.9981
CGP-8	0.1962	7.7068	0.9945
CGP-10	0.1110	4.3304	0.9983

Isıtma dataları için sonunda UBSA modeli oluşturulmuştur. Çözümlerde, UBSA için 5 adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının ve üyelik fonksiyon sayılarının model üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanılan üyelik fonksiyonları; gbell, gauss2, tri, gauss ve trap üyelik fonksiyonlarıdır. Çalışmada, en iyi fonksiyon sayısı 2 olarak bulunmuştur. Şekil 8.23'de en iyi çözüme ulaşılan tri2 üyelik fonksiyonu için deneysel değerler ile UBSA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.23. Tri üyelik fonksiyonu için TKIP sisteminin COP değerinin UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

Tablo 8.4’de UBSA modeli için elde edilen çözümlerin R^2 , RMS ve cov değerlerinin birlikte görünümü verilmiştir.

Tablo 8.4. UBSA modelinde soğutma modu için TKIP sistemi COP’unun istatistiksel değerleri

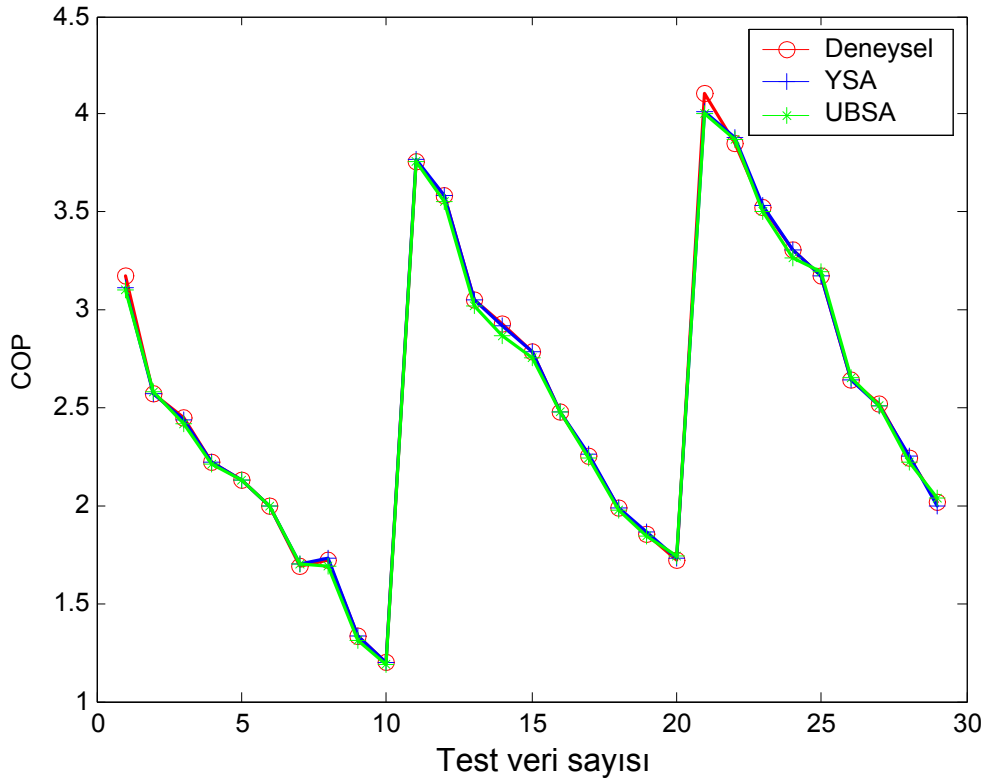
ÜF-ÜFS	RMS	cov	R^2
Gbell	0.0554	2.1640	0.9996
Gauss2	0.0421	1.6400	0.9998
Gauss	0.0547	2.1355	0.9996
Tri	0.0238	0.9276	0.9999
Trap	0.0679	2.6465	0.9994

ÜF: Üyelik fonksiyonu, ÜFS; Üyelik fonksiyon sayısı

Sonuç olarak, YSA ve UBSA’nın tahmini COP değerleri ile deneyden alınan gerçek COP değerlerinin değişimi Şekil 8.24’de verilmiştir. Isıtma dataları için YSA modelinde en iyi algoritma olan LM8’deki R^2 değeri 0.9998 olarak hesaplandığı halde, UBSA için oluşturan model’de ise en iyi üyelik fonksiyonu tri2 olup R^2 değeri 0.9999 olarak bulunmuştur. Yani sonuçta bu datalar için UBSA, YSA’dan daha iyi bir çözüm ortaya koymuştur.

Kullanılan ANFIS bilgisi aşağıdaki gibidir;

- Düğüm sayısı: 55
- Lineer parametre sayısı: 80
- Non-lineer parametre sayısı: 24
- Toplam parametre sayısı: 104
- Eğitim için data çiftlerinin sayısı: 58
- Bulanık kural sayısı: 16



Şekil 8.24. TKIP sisteminin COP değerinin YSA, UBSA ve deneysel olarak karşılaştırılması

8.4. Mevcut Modellerinin Literatürde Yapılan Çalışmalara Uyarlanması

Yaptığımız çalışmada kurduğumuz modellerin doğruluğunu kanıtlamak için, literatürde TKIP sistemlerini inceleyen ulusal ve uluslararası bütün çalışmalar incelenmiştir. Ancak, kullanabileceğimiz dataları bulabileceğimiz tek deneysel çalışma İzmir’de kurulu olan bir TKIP sistemi ile yapılan bir Yüksek Lisans Tez çalışmasıdır [59]. Söz konusu çalışmada, soğutma modunda sistem çalışırken toplam 33 data kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan datalar, deney yapılan günlere göre Tablo (8.5-8.8)’de gösterilmiştir. Datalar; T1: Odaya giden su

sıcaklığı, T2: odadan dönen su sıcaklığı, T3: TID'dan gelen su sıcaklığı, T4: TID'a giden su sıcaklığı'dır. Bu verilere göre hesaplanan COP değerleri de tablolarda verilmiştir.

Tablo 8.5. 25.07.2000 tarihli deney sonuçları

Zaman	09:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	16:00
T1	10.4	10.3	10.1	10.2	10.5	10.4	10.4	10.4	10.5	10.7
T2	12.9	12.6	12.3	12.3	12.6	12.5	12.6	12.5	12.6	12.9
T3	24.6	29	31.2	32	33.2	34.3	35	35.5	36	36
T4	26.6	31.2	33.1	34.2	35.4	36.3	36.9	37.7	38.2	37.4
COP	2.51	2.31	2.21	2.11	2.11	2.11	2.21	2.11	2.11	2.21

Tablo 8.6. 26.07.2000 tarihli deney sonuçları

Zaman	12:45	13:15	13:45	14:15	15:15	15:45
T1	7.6	7.6	8	7.7	7.8	7.9
T2	10.5	10.5	10.9	10.5	10.8	10.8
T3	27	27	27	26.7	27.8	28
T4	28.1	27.6	27.6	27.6	28.4	28.6
COP	2.92	2.92	2.92	2.82	3.02	2.92

Tablo 8.7. 29.07.2000 tarihli deney sonuçları

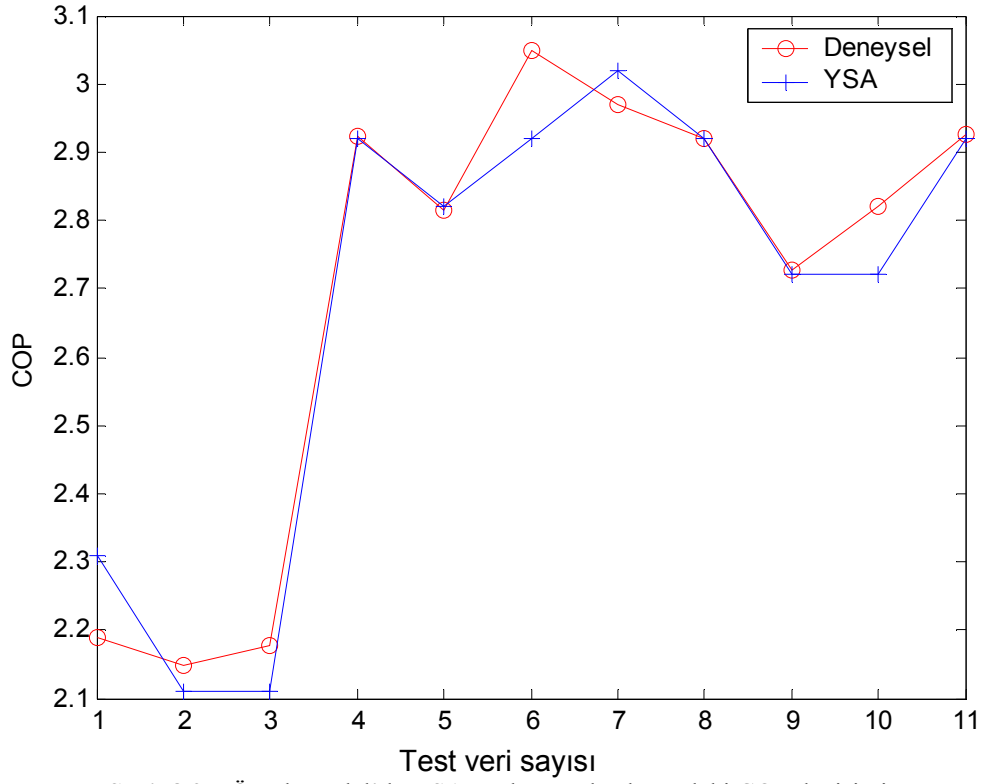
Zaman	15:15	15:45	16:15	17:15
T1	9.5	9.6	9.5	9.3
T2	12.5	12.5	12.4	12.2
T3	24	25.6	26	27
T4	24.6	26	26.6	27.3
COP	2.92	2.92	2.92	3.02

Tablo 8.8. 31.07.2000 tarihli deney sonuçları

Zaman	10:30	11:00	11:30	12:10	12:30	13:00	13:20	15:10	15:40	16:10	16:30	16:40	17:00
T1	8.5	8.4	8.5	8.4	8.6	9.3	9.7	10.7	10	9.2	8.9	8.9	8.7
T2	11.4	11.3	11.4	11.3	11.4	12	12.4	13.4	12.7	12	11.8	11.8	11.6
T3	24.6	25	25	26	26	26	26	27	27	27	27	28	28
T4	24	25.3	25.8	26.3	26.4	26.7	26.9	27.8	27.9	28	28.1	28.2	28.2
COP	2.92	2.92	2.92	2.92	2.82	2.72	2.72	2.72	2.72	2.82	2.92	2.92	2.92

YSA ve UBSA modelinde toplam 33 data ilk önce karıştırılmıştır, daha sonra 22 tanesi ile eğitim, geriye kalan 11 tanesi ile de test yapılmıştır. Kendi datalarımıza uyguladığımız işlem sırası aynı şekilde bu datalara da uygulanmıştır.

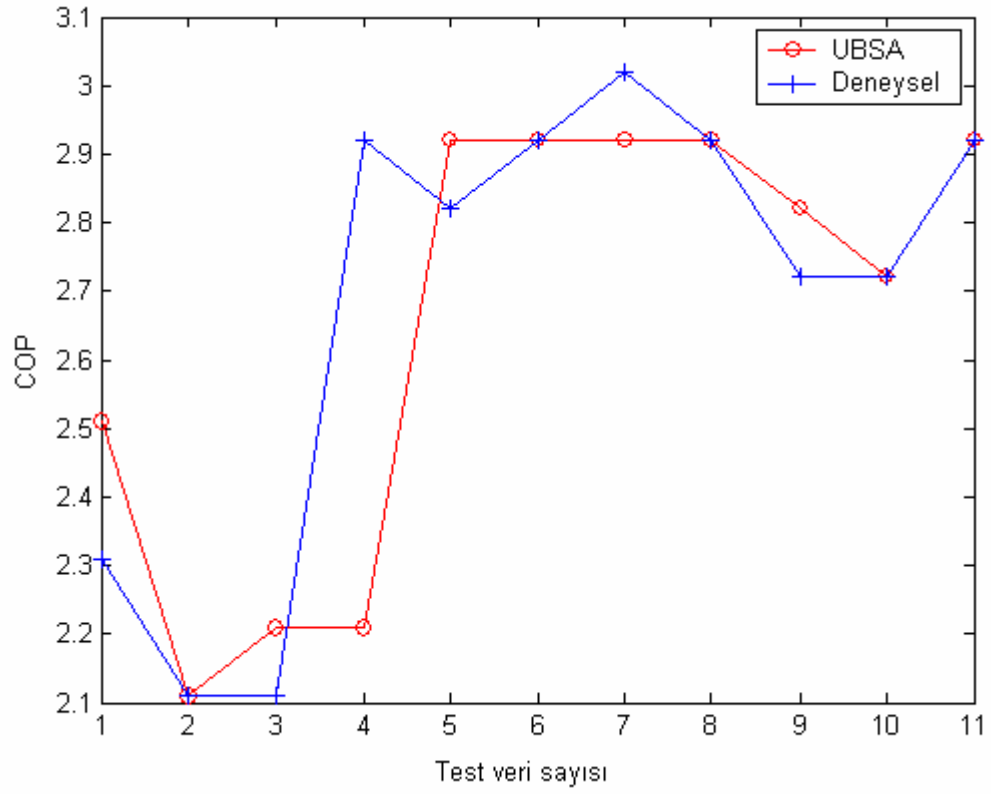
İlk önce YSA modeli kurularak MATLAB programı yardımıyla çıkışlar elde edilmiştir. Şekil 8.25'de örnek model'den alınan datalar yardımıyla YSA ve deneysel test verilerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 8.25. Örnek model’de YSA ve deneysel çalışmadaki COP değişimi

YSA modelinde hesaplanan RMS değeri, 0.0670, R^2 değeri 0.9994 ve cov değeri ise 2.4841 olarak bulunmuştur. Şekil 8.25’e ilk bakıldığında deneysel değerlerle YSA modelinden çıkan değerlerin birbirine yakın çıkmadığı görülür. Fakat, yapılan deneylerde COP değerleri birbirine çok yakındır. Programdan çıkan hesaplar sonucu, %99.94 oranında bir doğruluk vardır.

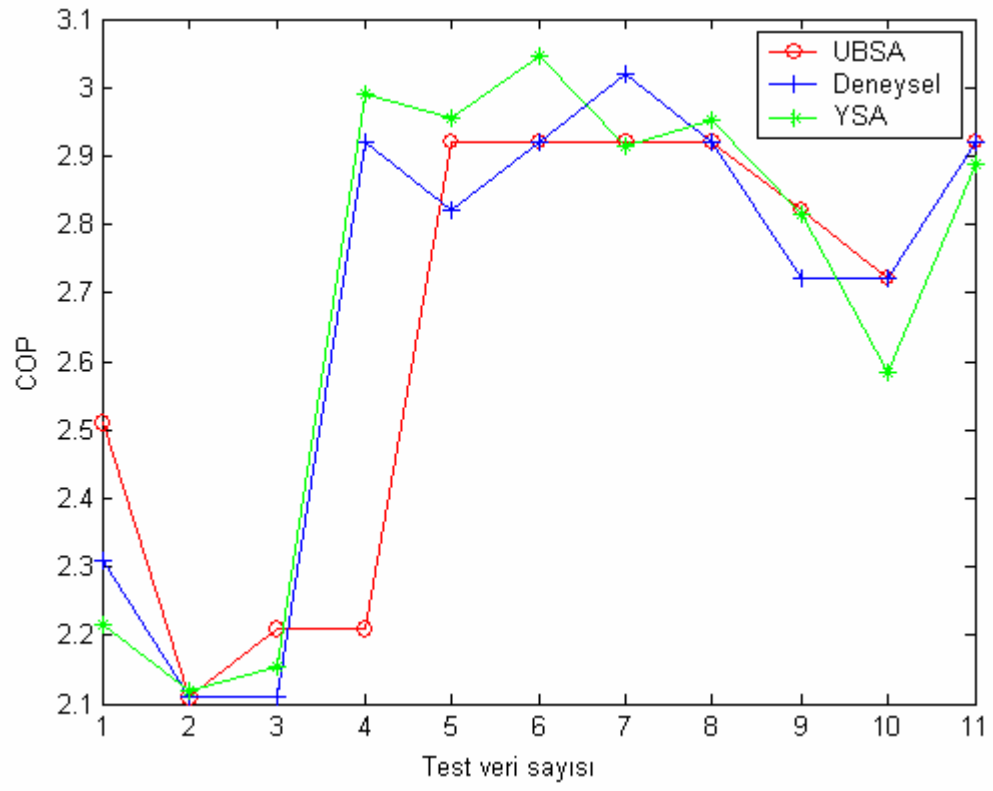
Daha sonra ele alınan örnek deney dataları için UBSA modeli oluşturulmuştur. Çıkan sonuç Şekil 8.26’de verilmiştir.



Şekil 8.26. Örnek model’de UBSA ve deneysel çalışmadaki COP değişimi

UBSA modelinde hesaplanan RMS değeri, 0.2304, R^2 değeri 0.9926 ve cov değeri ise 8.6867 olarak bulunmuştur. Şekil 8.25 için yapılan yorumlar Şekil 8.26 için de yapılabilir. Burada da oluşturulan modelin doğruluğu %99.26 oranındadır.

Örnek model uygulaması için yaptığımız çalışmanın en sonunda ise deneysel çalışmadan hesaplanan COP değerleri ile YSA ve UBSA modelinde elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır, bu karşılaştırma Şekil 8.27’de verilmiştir. Data sayısı artırılarak sonuçlar daha iyi elde edilebilir.



Şekil 8.27. Örnek model’de YSA , UBSA ve deneysel çalışmadaki COP değişiminin gösterimi

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alternatif ısıtma ya da soğutma sistemlerden birisi olan TKIP'lar; düşük maliyetli, güvenli ve çevre dostu özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Toprağı ısı kaynağı ya da kuyusu olarak kullanan bir TKIP sistemi, Elazığ iklim şartlarında tasarlanmış ve üniversite-sanayi imkanları ile kurulmuştur. Bu amaçla, üç farklı derinlikteki (30, 60, 90 m) düşey tipli U-borusu toprak ısı değiştiricisi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bazı önemli sonuçlar maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir:

1. TKIP sistemlerinin tasarımında en önemli aşamalarından birisi, ısı duyarlılık testi (IDT)'nin yapılmasıdır. Bu testle, ısı değiştiricisi borularının gömüldüğü toprağın ısı özellikleri tespit edilmektedir. Bu amaçla, mevcut çalışmada TÜBİTAK tarafından alınan maddi destek ile bir test cihazı kiralanmıştır. 60 ve 90 m'lik sondaj kuyularından her biri için 48 saat yapılan test sonucunda, toprağın ortalama efektif ısı iletkenliği her iki kuyuda da 1.70 W/mK olarak ölçülmüştür. Ayrıca, aynı yöntemle sondaj kuyusunun ısı direnci de saptanmıştır. Bu değerler, 60 ve 90 m'lik kuyular için sırasıyla 0.05 ve 0.03 K/(W/m) olarak elde edilmiştir. Bu değerler, kuyuların dolgu bölgesinin ısı dirençlerini belirtmekte olup 90 m'lik kuyuda ısı direncin 60 m'lik kuyuya göre daha düşük çıkmasının sebebi, 90 m'lik kuyudaki yer altı suyu hareketliliği ve suyun kuyuyu dolaşma süresinin daha fazla oluşudur.
2. Deneyler hem soğutma hem de ısıtma modu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Ancak deneylerde ortaya çıkan bazı problemler (soğutucu akışkan ve su-antifiriz akışkanı debi değişimi, bakır boru bağlantılarının değişimi vb.) yüzünden soğutma ve ısıtma deneyleri için aynı şartlar oluşturulamamıştır. Soğutma ve ısıtma performansları üzerinde sondaj derinliğinin etkisi her iki mod (soğutma ve ısıtma) için araştırılmıştır. Soğutma sezonu boyunca 30, 60 ve 90 m derinliğinde ortalama toprak sıcaklıkları sırasıyla 19.97, 16.23 ve 13.37 °C olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, ısıtma sezonunda ölçülen bu sıcaklıklar sırasıyla 13.35, 17.07 ve 21.02 °C'dir. Soğutma mevsimindeki ısı sistem performansları (COP_{sis}) 30, 60 ve 90 m'deki sondaj sistemleri için sırasıyla 3.37, 3.85 ve 4.33 iken, bu değerler ısıtma mevsiminde ise sırasıyla 1.93, 2.37 ve 3.03 olarak elde edilmiştir. Yapılan soğutma ve ısıtma deney sonuçlarına göre, 90 m derinlikteki ısı değiştiricili sistem en yüksek sistem performansı sağlamıştır. Ulusal imkânlarla imal edilen sistemin uluslararası kabul

gören performans irdelme standartlarına [42] uygun olarak mukâyesesi yapılmış ve kurulan sistemin yüksek COP değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

3. Soğutma periyodunda yapılan günlük deneylerde toprağa atılan en yüksek ısı miktarı 90.3 W/m iken en düşük değeri de 49.1 W/m olarak hesaplanmıştır. Isıtma modunda ise topraktan çekilen en yüksek ısı miktarı 81.9 W/m iken en düşük değeri de 45.6 olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki değerlere göre bu veriler son derece iyidir [31, 50].
4. Kışın buharlaştırıcıya giren su-antifriz karışımının sıcaklığı arttığında daha yüksek COP_{sis} , yazın ise yoğunlaştırıcıya giren su-antifriz karışımının sıcaklığı arttığında daha düşük COP_{sis} elde edilmiştir.
5. Toprak ısı değiştiricisi içinde dolaşan su-antifriz karışımının debisi arttıkça, sirkülasyon pompasının güç tüketimi yüksek olmuş ve daha düşük COP_{sis} elde edilmiştir.
6. Soğutma periyodu için yapılan ekserji analizinde; ısı pompası ünite bazında 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için ekserji verimleri sırasıyla %70, 78.3 ve 82.6 olarak hesaplanmışken, sistem bazında ise bu değerler sırasıyla %68.4, 71.3 ve 75.8 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde ısıtma periyodu için yapılan ekserji analizinde ise; ısı pompası ünite bazında 30, 60 ve 90 m'lik kuyular için ekserji verimleri sırasıyla %64.1, 69.3 ve 71.4 olarak hesaplanmışken, sistem bazında bu değerler sırasıyla %60, 65.7 ve 66.6 olarak hesaplanmıştır.
7. Sondaj kuyusunun (borehole) sıcaklık dağılımı iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS paket programı ile hesaplanmıştır. Sondaj kuyusu dışındaki toprak bölgeleri ısıl olarak bentonitli bölgeden etkilenmediği için sadece sondaj kuyusu bölgesi incelenmiştir. Gidiş ve dönüş boruları arasında ısıl etkileşim oldukça fazladır. Soğutma modunda, borulara daha uzak olan bölgelerde bir sıcaklık azalması söz konusu iken ısıtma modunda ise bu bölgelerde sıcaklık artışı gözlenmiştir.
8. YSA ve UBSA modelleri ile hem soğutma hem de ısıtma dataları için TKIP sisteminin performans tahmini yapılmıştır. YSA modelinde üç farklı algoritma kullanılarak, ara katman sayısı değiştirilmiştir. UBSA modelinde üyelik fonksiyonlarının ve üyelik fonksiyon sayılarının model üzerindeki etkisi incelenmiştir. Soğutma dataları için, YSA modelinde en iyi algoritma LM8 olup bu algoritmanın R^2 değeri 0.9998'dir. UBSA modeli için, en iyi üyelik fonksiyonu gauss2 olup R^2 değeri 0.9999'dır. Isıtma dataları için, YSA modelinde en iyi algoritma LM8 olup R^2 değeri 0.9998 iken UBSA için oluşturan model'de ise en iyi üyelik fonksiyonu tri2 olup R^2 değeri 0.9999'dır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi

oluşturulan modellerde %99.9 oranında doğruluk vardır. Bu modellerin doğruluğunu ispatlamak için literatür araştırması yapılarak örnek deneysel çalışmalardan veriler alınmıştır. Bu veriler kullandığında YSA ve UBSA modellerinde yine %99.9 oranında bir doğruluk elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu yöntemlerle TKIP sisteminin modellenmesi kolayca yapılmıştır.

İleriye yönelik çalışmalar ve öneriler:

Ayrıca, TÜBİTAK tarafından alınan destekle TKIP sistemi PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) ile PI (Orantısız-İntegral) ve PID (Orantısız-İntegral-Türevsel) kontrol edilecektir. Topraktan dönen su-antifiriz ve oda içi sıcaklıklarının durumuna göre sistem kontrol edilecektir. Farklı sıcaklıklarda olan üç odanın sıcaklığından belirli bir sıcaklık değeri düşürülerek veya artırılarak konfor şartları sağlanacaktır.

U-borusunun yerleştirildiği sondaj deliği bölgesinin herhangi bir dolgu malzemesi ile dolumu iyi bir şekilde yapılmalı ve boşluk kalmamasına özen gösterilmelidir. Aksi takdirde, ısı geçişi istenen düzeyde olmayacaktır. Bu, sonuçta bizim ısı pompasına aşırı bir şekilde yüklenmemize neden olacaktır.

Standart bentonit esaslı dolgular ısı iletkenliği 0.73 W/mK olan en çok kullanılan dolgu malzemeleridir. Ancak, bentonitin sondaj kuyusu içindeki ısı transferi üzerindeki olumsuz etkisini gidermek için literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır. Standart bentonit esaslı dolgular ile düşey U-borulu toprak ısı değiştiricisi boyunca oluşan dolgular, ısı kaynağı/kuyusu ile ısı değiştirgeci arasında ısı direnç oluştururlar. Bu olumsuzluğu gidermek için, ısı iletkenliği yüksek dolgular üzerinde çalışılmaktadır. Çimentoyu andıran karışımlar ve bentonit/kuartz kumlu karışımlar gibi iki farklı ısı iletkenliği artırıcı malzeme geliştirilmiştir [24]. Türkiye’de de tasarlanan TKIP sistemlerinin artık bentonit dolgu ile değil de ısı iletkenliği daha iyi olan dolgu malzemeleriyle tasarlanıp kurulması gerekir.

Bu tür sistemlerde, toprak ısı değiştiricisi önemli bir maliyet unsuru oluşturmaktadır. Bu maliyetin azaltılması için dolgu malzemesinin uygun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Sisteme güneş kolektörleri bağlanarak özellikle kuzey iklimlerde toprak ısı değiştiricisi yükünde bir düşüş sağlanabilir ve toprak ısı değiştiricisi uzunluğu azaltılabilir ve haliyle de maliyette düşüş sağlanabilir.

Sonuçta, toprak ısı değiştiricileri ve sondaj kazı maliyetleri düşürülürse ve yerli teknoloji ile ısı pompası sistemleri üretilirse, TKIP sistemleri ülkemizde hem ekonomik hem de çevresel yararlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Couvillion, R. J., 1985, Field and laboratory simulation of earth – coupled heat pump coils, ASHRAE Transactions, 2b, No. 91, 1326-34.
2. Catan, M.A. and Baxter, V.D., 1985, An optimized ground coupled heat pump system design for Northern climate applications, ASHRAE Transactions, 2b, No. 91, 1185-1203.
3. Hughes, P.J., Loomis, L., O’Neil R.A. and Rizzuto, J., 1985, Results of the residential earth coupled heat pump demonstration in Upstate New York, ASHRAE Transactions, 2b, No. 91, 1307-25.
4. Franck, P. and Berntsson, T., 1985, Ground coupled heat pumps with low temperature heat storage: some Swedish experiences, ASHRAE Transactions, 2b, No.91, 1285-96.
5. Fleming, W., 1987, Ground-source heat pump design and operation- experience within an Asian Country, ASHRAE Transactions, 1b, No. 104, 771-74.
6. Eskilson, P., 1987, Thermal analysis of heat extraction borehole, Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
7. Kavanaugh, S., 1989, Design considerations for ground and water source heat pumps in Southern Climates, ASHRAE Transactions, 1, No. 95, 1139-49.
8. Martin, S.D., 1990, A design and economic sensitivity study of single-pipe horizontal ground-coupled heat pump systems, ASHRAE Transactions, 1, No. 96, 634-42..
9. Mei, V.C., 1990, Experimental study of direct-expansion ground coil heat exchangers, ASHRAE Transactions, 1, No. 96, 821-28.
10. Safemazandarani, P., Edwards, J.A., Johnson, R.R., and Mohammad-Zadeh, Y., 1990, Mathematical modeling of a direct expansion ground coupled heat pump system, ASHRAE Transactions, 1, No. 96, 583-89.
11. Kavanaugh, S.P. and Pezent, M.C., 1990, Lakewater applications of water-to-air heat pumps, ASHRAE Transactions, 1, No. 96, 813-20.
12. Sulatisky, M.T., and Van Der Kamp, G., 1991, Ground-source heat pumps in the Canadian Prairies, ASHRAE Transactions, 1, No. 97, 374-85.
13. Sorour, M. M., El Din, M. S., and Mahmoud, R. A., 1991, Heating of the soil below a cold store, Applied Energy, 39, 1, 45-57.
14. Kavanaugh, S.P., 1992, Field test of a vertical ground coupled heat pumps in the Alabama, ASHRAE Transactions, 2, No. 98, 607-16.
15. Meloy, B.R., 1992, Free cooling works for Cowlitz County Hall of Justice, ASHRAE Transactions, 1, No. 98, 1023-30.

16. Rafferty, K.D., 1992, Large tonnage groundwater heat pumps-experiences with two systems, ASHRAE Transactions, 1, No. 98, 587-92.
17. Hatten, M.J., 1992, Groundwater heat pumping: lessons learned in 43 years at the building, ASHRAE Transactions, 2, No. 98, 1031-37.
18. Jacovides, C.P., and Mihalakakou G., 1995, An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes, Renewable Energy, 6, 8, 893-900.
19. Kangas, M.T., 1996, Thermohydraulic analysis of ground as a heat source for heat pumps using vertical pipes, Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 118, 300-305, Dec.
20. Petit, P.J., and Meyer, J.P., 1998, Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air-source air conditioners in South Africa, Energy J., 23, 2, 137-43.
21. Leong, W.H., Tarnawski, V.R. and Aittomaki, A., 1998, Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance, Int. J. Refrig., 21, 8, 595-606.
22. Phetteplace, G. and Sullivan, W., 1998, Performance of a hybrid ground-coupled heat pump system, ASHRAE Transactions, 1b, No. 104, 763-70.
23. Den Braven, K.R., 1998, Antifreeze acceptability for ground-coupled heat pumps ground loops in the United States, ASHRAE Transactions, 1b, No. 104, 938-43.
24. Spilker, E.H., 1998, Ground coupled heat pump loop design using thermal conductivity testing and the effect of different backfill material on vertical bore length, ASHRAE Transactions, 1b, No. 104, 775-79.
25. Kavanaugh, S., 1998, Development of design tools for ground-source heat pump piping, ASHRAE Transactions, 1b, No. 104, 1932-37.
26. Salah El-Din, M.M., 1999, On the heat flow into the ground, Renewable Energy, 18, 473 -90.
27. Piechowski, M., 1999, Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: theoretical development, International Journal of Energy Research, 23, 571-88, (1999).
28. Tarnawski, V.R., Gori F., Wagner, and Buchan, G.D., 2000, Modelling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures, International Journal of Energy Research, 24, 5, 403-23.
29. Rees, S.W., Adjali, M.H., Zhou, Z., Davies M. and Thomas H.R., 2000, Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4, 3, 213-65.
30. Bernier, M.A., 2001, Ground-coupled heat pump system simulation, ASHRAE Transactions, 107, No.1, 605-16.

31. Pahud, D., and Matthey, B., 2001, Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ, *Energy and Buildings*, 33, 5, 503-507.
32. Yavuzturk, C., 2001, Field validation of a short time step model for vertical ground-loop heat exchangers, *ASHRAE Transactions*, 107, No. 1, 617-25.
33. Kavanaugh, S.P., and McInerny, S.A., 2001, Energy use of pumping options for ground-source heat pumps, *ASHRAE Transactions*, 107, No. 1, 589-99.
34. Parent, M., A simplified tool for assessing the feasibility of ground-source heat pump projects, *ASHRAE Transactions*, 1, 120-129, (2001).
35. Sodha, M.S., 2001a, Simulation of dynamic heat transfer between ground and underground structures, *International Journal of Energy Research*, 25, 15, 1391-94.
36. Sodha, M.S., 2001b, Simulation of periodic heat transfer between ground and underground structures, *International Journal of Energy Research*, 25, 8, 689-93.
37. De Swardt, C.A. and Meyer J.P., 2001, A performance comparison between an air source and a ground-source reversible heat pump, *International Journal of Energy Research*, 25, 10, 899-910.
38. Mihalakakou, G., 2002, On estimating soil surface temperature profiles, *Energy and Buildings*, 34,3, 251-59.
39. Bi, Y., Chen, L., and Wu, C., 2002, Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification, *Applied Thermal Engineering*, 22, 2, 183-89.
40. Zeng, H.Y., Diao, N.R., and Fang, Z.H., 2002, A finite line-source model for boreholes in ground heat exchangers, *Heat Transfer—Asian Research*, 31,7, 558–67.
41. Sutton, M.G., Couvillion, R.J., Nutter, D.W., and Davis, R.K., An algorithm for approximating the performance of vertical bore heat exchangers installed in a stratified geological regime, *ASHRAE Transactions*, 108, No. 2, 177-84.
42. Sanner, B., Karytsas C., Mendrinou D., and Rybach, L., 2003a, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, 32, 4-6, 579-88.
43. Lund, J.W., 2003, The use of downhole heat exchangers, *Geothermics*, 32, 4-6, 535-43.
44. Sanner, B., Mands E., and Sauer, M.K., 2003b Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany, *Geothermics*, 32, 4-6, 589-602.
45. Lam, J.C., and Chan, W.W., 2003, Energy performance of air-to-water and water-to-water heat pumps in hotel applications, *Energy Conversion and Management*, 44,10, 1625-31.

46. Doherty, P.S., Al-Huthaili, S., Riffat, S.B., and Abodahab N., 2004, Ground source heat pump—description and preliminary results of the Eco House system, *Applied Thermal Engineering*, 24, 17-18, 2627-41.
47. Roth, P., Georgiev, A., Busso, A., and Barraza, E., 2004, First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America, *Renewable Energy*, 29, 12, 1947-63.
48. Bi, Y., Guo, T., Zhang, L., and Chen, L., 2004, Solar and ground source heat-pump system, *Applied Energy*, 78, 2, 231-245.
49. Diao, N., Li, Q., and Fang Z., 2004, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 12, 1203-11.
50. Kyriakis, N., Michopoulos, A., and Pattas, K., 2005, On the maximum thermal load of ground heat exchangers, *Energy and Buildings*, 38, 1, 25-29.
51. Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., and Gehlin, S., 2005, Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey April 24-29.
52. Trillat-Berdal, V., Souyri, B., and Fraisse, G., 2006, Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors, *Energy and Buildings*, 38, 12, 1477-84.
53. Nagano, K., Katsura, T., and Takeda, S., 2006, Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, 1578-92.
54. Lim, K., Lee, S., and Lee, C., 2007, An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 8, 985-90.
55. Florides, G., and Kalogirou, S., 2008, First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus, *Applied Thermal Engineering*, 28, 2-3, 157-63.
56. Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl, T., 2007, Numerical evaluation of thermal response tests, *Geothermics*, 36, 2, 141-66.
57. Phetteplace, G., 2007, Geothermal Heat Pumps, *Journal of Energy Engineering*, 133, 1, 32-38.
58. Michopoulos, A., Bozis, D., Kikidis, P., Papakostas, K., and Kyriakis, N.A., 2007, Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece, *Energy and Buildings*, 39, 3, 328-34.
59. Hancıoğlu, E., 2000, Güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı ısı pompası ile bir hacmin ısıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 196s.-197s.

60. Ersöz, İ., 2000, Toprak kaynaklı ısı pompası ile bir hacmin soğutulması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 10s.-11s.
61. Ataman, H., 1991, Toprak kaynaklı bir ısı pompası tesisinin tasarımı ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
62. Savaş, A.F., 1996, Toprak kaynaklı ısı pompası ile konut ısıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100s.-117s.
63. Hepbasli, A., Eltez M. and Duran H., 2001, Current status and future directions of geothermal heat pumps in Turkey, *GHC Bulletin*, March.
64. Diz, T., 2001, Minimum enerjili bina tasarımı (Toprak enerjisiyle), Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-5.
65. Kıncay, O., ve Temir, G., 2002, Toprak kaynaklı ısı pompalı sistemlerin ekonomik incelenmesi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Mart-Nisan, s. 31-37.
66. Inalli, M., and Esen, H., 2004, Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 24, 14-15, 2219-32.
67. Inalli, M., and Esen, H., 2005, Seasonal cooling performance of a ground-coupled heat pump system in a hot and arid climate, *Renewable Energy*, 30, 9, 1411-24.
68. Ozgener, O., Hepbasli, A., and Ozgener, L., 2007, A parametric study on the exergoeconomic assessment of a vertical ground-coupled (geothermal) heat pump system, *Building and Environment*, 42, 3, 1503-09.
69. Esen, H., Inalli, M., and Esen, M., Technoeconomic appraisal of ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey, *Energy Conversion and Management*, 47, 9-10, 1281-97.
70. Esen, H., Inalli, M., and Esen, M., 2007a, Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system, *Building and Environment*, 42, 3, 1126-34.
71. Esen, H., Inalli, M., and Esen, M., 2007b, A techno-economic comparison of a ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling, *Building and Environment*, 42, 5, 1955-65.
72. Esen, H., Inalli, M., Esen, M., and Pihtili, K., 2007c, Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers, *Building and Environment*, 42, 10, 3606-15.
73. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., and Esen, M., 2007d, Forecasting of a ground-coupled heat pump performance using neural networks with statistical data weighting pre-processing, *Int. J. Thermal Sciences*, in press.

74. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., and Esen, M., 2007e, Modelling a ground-coupled heat pump system using adaptive neuro-fuzzy inference systems, *International Journal of Refrigeration*, in press.
75. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., and Esen, M., 2007f, Performance prediction of a ground-coupled heat pump system using artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, in press.
76. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., and Esen, M., 2007g, Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy assessments for ground-coupled heat pump system, *Energy and Buildings*, in press.
77. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., and Esen, M., 2007h, Modelling a ground-coupled heat pump system by a support vector machines, *Renewable Energy*, article in press.
78. Özyurt, O., Bakırcı, K., Ekinci, D.A. ve Çomaklı, K., 2007, Erzurum’da Toprak kaynaklı ısı pompasının deneysel incelenmesi, ULIBTK’07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs-2 Haziran, Kayseri, 847-53.
79. Bakırcı, K., Özyurt, O., Çomaklı, Ö. ve Şahin, B., 2007, Soğuk iklim bölgesinde güneş ve toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin deneysel incelenmesi, ULIBTK’07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs-2 Haziran, Kayseri, 1058-62.
80. Ünlü, K., Coşkun, S. ve Yamankaradeniz, N., 2007, Bursa ili şartlarında toprak kaynaklı ısı pompası ile ısıtma uygulaması, ULIBTK’07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs-2 Haziran, Kayseri, 460-68.
81. ASHRAE, 1995a, *Ashrae Handbook, HVAC Applications*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
82. Grant, M.A., Donaldson, I.G., and Bixley, P.F., 1982, *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press.
83. Hart, D.P. and Couvillion, R., 1996, *Earth-Coupled Heat Transfer*, National Water Well Association, Dublin, OH.
84. Chiasson, A.D., 1999, *Advances in modeling of ground-source heat pump systems*, Master Thesis, Oklahoma State University.
85. Kavanaugh, S.P., and Rafferty, K., 1997, *Ground-source heat pumps. Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
86. ASHRAE, 1995b, *Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, G.A.
87. Demir döküm KTH 2.0, www.demirdokum.com.tr

88. Sachs, H.M., and Dinse, D.R., 2000, Geology and the ground heat exchanger: What engineers need to know, *ASHRAE Transactions*, 106, 2, 421-33.
89. Lim, K., Lee, S., and Lee, C., 2007, An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 8, 985-90.
90. Gehlin, S., 1998, Thermal response test in-situ measurements of thermal properties in gird rock, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology Department of environmental Engineering Division of Water Resources Engineering Sweden.
91. Hellström, G., and Gehlin, S., 1997, Direct cooling of telephone switching stations using a borehole heat exchanger, *Proc. of MEGASTOCK'97 7TH International Conference on Thermal Energy Storage*, Vol. 1, pp. 235-41.
92. Austin, W.A., 1998, Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties, Master Thesis, Oklahoma State University, USA.
93. Gehlin, S., 2002, Thermal response test – method development and evaluation, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
94. Ping, C., Hongxing, Y., and Zhaohong, F., 2006, Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined borehole, *Applied Thermal Engineering*, 26, 11–12, 1169–75.
95. Witte, H., Van Gelder, G.J., and Spitler, J.D., 2002, In situ measurement of ground thermal conductivity: the Dutch perspective, *ASHRAE Transactions*, 108, No. 1, 263–72.
96. Turgut, B., 2002, Yeraltında termal enerji depolama tekniklerinde belirleyici koşulların incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
97. Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl T., 2007, Numerical evaluation of thermal response tests, *Geothermics*, 36, 2, 141-66.
98. Allan M.L., and Kavanaugh S.P., 1999, Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps, *HVAC&R Res.*, 5, 2, 85-96.
99. Remund, C.P., 1997, Grouting for vertical geothermal heat pump systems: Engineering design and field procedures manual, EPRI Final Rep. No. TR-109169, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
100. Çengel, Y.A., and Boles, M.A., 1996, *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, Literatür Yayıncılık.
101. Holman, J.P. 1994, *Experimental methods for engineers*. 6th ed. McGraw-Hill Book Co.-Singapore.
102. Nutter, D.W., 2000, Novel 4-way refrigerant reversing valve for heat pumps, I&I Technical Semi-Annual Report.

103. Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, 2007, Dış hava ve toprak sıcaklıkları değerleri (2006-2007), Elazığ.
104. Hepbaşlı, A. ve Ertöz A.Ö., 1999, Geleceğin teknolojisi: yer kaynaklı ısı pompaları, Makina Mühendisleri Odası Bildirisi, IPS – 31.
105. Büyüktür, A.R., 1986, Termodinamiğin Temel Yasaları, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Termodinamik Cilt. 1.
106. Krakow, K.I., 1991, Exergy analysis: Dead-state definition, ASHRAE Transaction, 97, No. 1, 328-36.
107. Dincer, I., Hussain, M.M., and Al-Zaharnah, I., 2004, Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia, Energy Policy, 32, 14, 1615-24.
108. Kotas, T.J., 1985, The exergy method of thermal plant analysis, Tiptree, Essex: Anchor Brendon Ltd.
109. Gong, M., and Wall, G., 1997, On exergetics, economics and optimization of technical processes to meet environmental conditions, In: TAIES97 International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, Beijing, China, 10–13 June, 453–60.
110. Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buldings, ASHRAE, Inc., Atlanta, GA.
111. Solvay Flour and Derivate, Solkane Refrigerant Software Version 3.01, Hannover, Germany.
112. Wark, K., 1995, Advanced Thermodynamics for Engineers. McGraw-Hill.
113. Bejan, A., 1988, Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley&Sons.
114. McQuiston, F.C., and Parker, J.D., 1988, Heating, ventilating, and air conditioning, Analysis and design, Third Edition, John Wiley&Sons.
115. Bridges, B.D., Harshbarger, D.S., and Bullard, C.W., 2001, Second law analysis of refrigerators and air conditioners. In: CD Proceedings of ASHRAE Winter Meeting, Atlanta, GA, USA.
116. An information survival kit for the prospective geothermal heat pump owner, <http://geoheat.oit.edu/ghptable.htm>
117. Çorlu Doğalgaz Dağıtım Anonim Şirketi, Şubat, 2007, Konut yakıt fiyatları, <http://www.cordas.com.tr>.
118. Yeşil çizgi firması katalogları, www.yesilcizgi.com.tr

119. Yaşar, C., 2004, Plastik üzerine kaplamalı kompozit malzemelerde gerilme analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
120. Gönen, E., 2004, Kaplamalı malzemelerde sıcaklığa bağlı gerilme analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
121. Allan, M.L. and Philippacopoulos, A.J., 1998, Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps: FY 1998 Progress Report, BNL 66103. 78pp.
122. Allan, M.L., 1997, Thermal conductivity of cementitious grouts for geothermal heat pumps: FY 1997 Progress Report, BNL 65129. 50 pp.
123. Philippacopoulos, A.J., Berndt, M.L., 2001, Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps, *Geothermics*, 30, No. 527-45.
124. Young, T.R., 2004, Development, verification, and design analysis of the borehole fluid thermal mass model for approximating short term borehole thermal response, Master Thesis, Oklahoma State University.
125. Allan, M.L., and Philippacopoulos, A.J., 2000, Performance characteristics and modelling of cementitious grouts for geothermal heat pumps, *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28- June 10*, pp. 3355-60.
126. Sağiroğlu, Ş., Beşdok, E., ve Erler, M., 2003, Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I: Yapay Sinir Ağları, *Ufuk Kitap Kırtasiye Yayıncılık*.
127. Öztemel, E., 2003, Yapay Sinir Ağları, *Papatya Yayıncılık*.
128. Gökbulut, M., 2007, Yapay Sinir Ağları, *Ders notları*.
129. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., and Williams, R.J., 1986, Learning internal representations by error propagation, in Rumelhart, D.E., and McClelland, J.L., *Parallel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of Cognition*, Cambridge, M.A. The MIT Press, vol.1, pp. 318-362.
130. Zurada, J.M., 1992, *Introduction to Artificial Neural Network*, West Publishing Company.
131. Elmas, Ç., 2003, *Bulanık Mantık Denetleyiciler (Kuram, Uygulama, Sinirsel Bulanık Mantık)*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
132. Arcaklıoğlu, E., Erisen, A. and Yilmaz, R., 2004, Artificial neural network analysis of heat pumps using refrigerant mixtures, *Energy Conversion and Management*, 45, 11-12, 1917-29.
133. Haykin, S., 1994, *Neural networks, A Comprehensive Foundation*, New York, USA, Macmillan College Publishing Company.

134. Moller, M.F., 1993, A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning, *Neural Networks*, 6, 525-33.
135. Sencan, A. and Kalogirou, S.A., 2005, A new approach using artificial neural networks for determination of the thermodynamic properties of fluid couples, *Energy Convers. Manage.*, 46, 15-16, 2405-18.
136. Becthler, H., Browne, M.W., Bansal, P.K. and Kecman, V., 2001, New approach to dynamic modelling of vapour-compression liquid chillers: artificial neural networks, *Appl. Therm. Eng.*, 21, 9, 941-53.

ÖZGEÇMİŞ

Hikmet ESEN, 09 Mayıs 1977 yılında Elazığ’ da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Elazığ’da tamamladı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitime başladı ve aynı yıl Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünde Doktora eğitime başladı. Halen Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. SCI/SCI-Expanded (Science Citation Index)’de taranan dergilerde Aralık 2007 tarihi itibarıyla 13 adet makalesi bulunmaktadır.

Hikmet ESEN