

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN YOLLARDAKİ
KAR VE BUZU ERİTMEK İÇİN KULLANILMASININ DENEYSEL
VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Asım BALBAY

Tez Yöneticisi:
Doç. Dr. Mehmet ESEN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN YOLLARDAKİ
KAR VE BUZU ERİTMEK İÇİN KULLANILMASININ DENEYSEL
VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Asım BALBAY

Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, 26/12/2007 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Mehmet ESEN

Üye : Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

Üye : Prof. Dr. Yasin VAROL

Üye : Doç. Dr. Hüsamettin BULUT

Üye : Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN

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

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen başta tez danışmanım sayın Doç. Dr. Mehmet ESEN'e, sayın Prof. Dr. Yasin VAROL'a, sayın Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR'e, sayın Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN'e, sayın Yrd. Doç. Dr. Celal SARSILMAZ'a; deney düzeneğinin kurulmasında bana yardımcı olan sayın Arş. Gör. Hikmet ESEN'e, sayın Levent TANRIÖVER'e (Elazığ Palu Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi – Makine Öğretmeni), sayın Ahmet ÇELİK'e (Elazığ 100. Yıl Anadolu Teknik Lisesi, Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi – Yapı Öğretmeni), sayın Selman GÖZLER'e (Elazığ Anadolu Teknik Lisesi, Teknik Lisesi ve Endüstri Meslek Lisesi – Elektrik Öğretmeni), Sayın Cuma Ali İNCE'ye (Elazığ Palu Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi – Elektrik Öğretmeni), sayın İnşaat Mühendisi Ömer Faruk DURSUN'a (Elazığ DSİ Bölge Müdürlüğü); malzeme ihtiyacını sağlayan Yeşil Çizgi Isı Teknikleri Şirketi personeline ve Devi Türkiye-Danfoss Grup Şirketi personeline; sayısal çalışma ile ilgili problemlerde internet ortamında bana yardımcı olan Anova şirketi personeline ve tezi hazırlama aşamasında bana her konuda destek olan sevgili eşim Kadriye BALBAY'a teşekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen 1154 nolu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP personeline de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLOLAR LİSTESİ	VI
SİMGELER LİSTESİ	VII
KISALTMALAR	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
2. KAR VE BUZ ERİTME İLE İLGİLİ ESASLAR	7
2.1. Kar ve Buz Oluşumu	7
2.2. Kar ve Buz Eritmek için Gerekli Isıl Hesaplar	8
2.2.1. Isıl Denge	9
2.2.2. Karsız Alan Oranı	9
2.2.3. Duyulur ve Gizli Isı Akısı Denklemleri	11
2.2.3.1. Duyulur Isı Akısı	11
2.2.3.2. Eritme Isı Akısı	12
2.2.4. Yüzeyde Oluşan Taşınım, Işınım ve Buharlaştırmadan Dolayı Isı Kayıpları	12
2.2.5. Isı Akısı Hesapları	16
2.2.6. Sırt ve Kenar Kayıpları	16
2.2.7. Blok Yüzeyinde Oluşan Yüzey Şartları	17
2.3. Kar Eritme Sistemlerinin Sınıflandırılması	20
2.3.1. Isı Borulu Sistem	20
2.3.2. Sulu Sistemler	21
2.3.2.1. TKIP Sistemi ile Kar ve Buzu Eritme	22
2.3.3. Elektrikli Kar Eritme Sistemleri	24
2.3.4. Kızıl Ötesi Isı Yayan Kar Eritme Sistemleri	25
2.4. Kar Eritme Sistemlerinde İşletme Maliyeti Hesabı	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	28
3.1. Sondaj Kısımının Hazırlanması	28
3.2. Isıl Duyarlılık Testi (IDT)	33
3.2.1. IDT'nin Çalışma Prensipleri	34
3.2.2. IDT Ölçümü Verilerinin Değerlendirilmesi	36

3.3. Kar Eritme Sistemlerinin Hazırlanması	40
4. SAYISAL ANALİZ	65
4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yazılımları.....	65
4.1.1 Fluent programı	65
4.1.2. Gambit programı	67
4.2. Isı Transferi Modeli	68
4.2.1. İletim ve Taşınım Isı Transferi.....	68
4.2.2. Viskoz Modeli.....	69
4.2.3. Süreklilik ve Momentum Denklemleri.....	71
4.3. Sayısal Çözümü Yapılacak Modeller.....	71
4.3.1. Toprak Modeli (Sondaj Deliği Kısım)	72
4.3.1.1. 30 m Derinliğindeki Kuyunun Sıcaklık Dağılımı	74
4.3.1.2. 60 m Derinliğindeki Kuyunun Sondaj Deliği Sıcaklık Dağılımı	75
4.3.1.3. 90 m Derinliğindeki Kuyunun Sıcaklık Dağılımı	76
4.3.2. Köprü ve Yer Bloğu Modeli	77
4.3.2.1. Model için Çözüm Yönteminin Belirlenmesi	79
4.3.3. Zamana Bağlı Çözüm.....	82
4.3.4. Zamana Bağlı Olmayan Çözümler.....	86
4.3.4.1. 30 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	86
4.3.4.2. 60 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	87
4.3.4.3. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	89
4.3.4.4. 30 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	90
4.3.4.5. 60 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	92
4.3.4.6. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	94
4.3.4.7. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılmaması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı	96
4.3.4.8. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılmaması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı.....	97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	110

KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 2.1	Kar erimede oluşan yüzey şartlarının değişimi- karın erimesi sırasında bloğun kesit görünüşü 17
Şekil 2.2	Karlı ve sulu kar eritme modelinde ısı transferinin şematik gösterilimi 18
Şekil 2.3	Sulu tabakada ısı transferinin şematik gösterilimi 19
Şekil 2.4	Isı borusunun şematik gösterimi 21
Şekil 2.5	Elektrikli ısıtma elemanlarının yerleşimi 24
Şekil 3.1	Kuyu açılacak alanın görünüşü 29
Şekil 3.2	Kuyu açılması sırasında bentonitin aktarılışı 29
Şekil 3.3	Sondaj kuyusunun açılmış halinin görünümü 30
Şekil 3.4	U-borusunun kuyuya yerleştirilmesi 31
Şekil 3.5	U-borusunun bentonit dolgusu ile dolgu yapılmış halinin görünümü 32
Şekil 3.6	30, 60 ve 90 m derinliğindeki kuyular ile köprü modelinin birlikte görünümü 32
Şekil 3.7	Kuyuların derinlikleri, aralarındaki mesafeleri ve U-borusunun topraktaki üç boyutlu görünümü 33
Şekil 3.8	IDT cihazı ile ölçümün şematik görünümü 35
Şekil 3.9	IDT akış şeması 35
Şekil 3.10	T_g-c 'nin logaritmik zamana karşı grafiği 38
Şekil 3.11	T_g-c 'nin logaritmik zamana karşı grafiği 39
Şekil 3.12	Köprü ve yer modeli için demir donatının görünümü 40
Şekil 3.13	Köprü ve yer modeli için 16 mm PX-b borunun ve sıcaklık ölçerlerin donatıya yerleşiminin görünümü 41
Şekil 3.14	Köprü ve yer blokları ile sondaj kuyuların geometrik özelliklerinin görünümü 42
Şekil 3.15	Borulu demir donatının beton bloğa yerleşiminin görünümü 43
Şekil 3.16	Boru ve sıcaklık ölçerlerin üstünün harç ile doldurulmasının görünümü 43
Şekil 3.17	Sensörün köprü bloğu içine yerleştirilişi 44
Şekil 3.18	Çalışmada kullanılan termostat, sensör ve kılıfının görünümü 44
Şekil 3.19	Boruların izolasyonun görünümü 45
Şekil 3.20	Köprü ve yer modelinin birlikte görünümü 45
Şekil 3.21	Termostatın elektrik bağlantısının olduğu pano içindeki görünümü 46
Şekil 3.22	Elektrik devresi şemasının görünümü 47
Şekil 3.23	Isı pompasının görünümü 51
Şekil 3.24	Köprü ve yer bloğunun, toprağın, boruların ve ısı pompasının bağlantı şematiği 52
Şekil 3.25	Deney düzeneğinin üç boyutlu görünüşü 55
Şekil 3.26	Blokta sıcaklık ölçümü alınan noktalar 56
Şekil 3.27	Karın nasıl eritildiğinin aşama aşama görünümü 57
Şekil 3.28	Sondaj kuyularında sıcaklık ölçümü yapılan noktaların görünümü 58
Şekil 3.29	Derinliklere göre toprak sıcaklığı ve dış hava sıcaklığının değişimi (10-15 Kasım 2006) 59
Şekil 3.30	Sistemde kullanılan gerilim ve akım ölçerin görüntüsü 61
Şekil 3.31	Üç farklı derinlik için sistemin COP'un zamanla değişiminin görünümü 62
Şekil 3.32	Üç farklı derinlikteki sondaj kuyularının köprü ve yer bloğu içi sıcaklığa etkisi 63
Şekil 3.33	Köprü/yer bloklarında ısı ısı transfer hızları 64
Şekil 4.1	Çözüm algoritması 67
Şekil 4.2	Toprak geometrisinin boyutları (üstten görünümü) 72
Şekil 4.3	Toprak geometrisi 73
Şekil 4.4	Geometriye sayısal ağ (mesh) uygulamasının üç boyutlu ve üstten görünümü 73
Şekil 4.5	Toprak, bentonit ve akışkan arasında sıcaklık dağılımı (30 metre) 74
Şekil 4.6	Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (30 metre) 75
Şekil 4.7	Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (60 metre) 76
Şekil 4.8	a) Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (90 metre) b) 30, 60 ve 90 m sondaj kuyularında sıcaklık dağılımının birlikte üst görünümü 77
Şekil 4.9	Modelde kullanılan blok boyutları 78
Şekil 4.10	Gambit programında modelin çizimi 78
Şekil 4.11	Geometrinin sayısal ağ biçimi 79

Şekil 4.12 Köprü veya yer modeli : a) kar veya buz tabakası b) beton (harç) c) PEX boru d) borunun kalıp içine serilmesi e) beton blok f) karlı blok.....	80
Şekil 4.13 Yüzeyde kar bulunması halinin görünümü.....	80
Şekil 4.14 Çözüm esnasında rezidüellerin değişimi	83
Şekil 4.15 Köprü bloğunda zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 0 s b) 3600 s c) 7200 s.....	84
Şekil 4.16 Yer bloğunda zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 0 s b) 3600 s c) 7200 s.....	85
Şekil 4.17 Köprü bloğundan su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığının değişimi (30 metre)	86
Şekil 4.18 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (30 metre).....	87
Şekil 4.19 Köprü bloğundan su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (60 metre).....	88
Şekil 4.20 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (60 metre).....	88
Şekil 4.21 Su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (90 metre)	89
Şekil 4.22 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı(90 metre).....	90
Şekil 4.23 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı(30 metre)	91
Şekil 4.24 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı(30 metre).....	92
Şekil 4.25 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı(60 metre)	93
Şekil 4.26 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı (60 metre).....	93
Şekil 4.27 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (90 metre)	94
Şekil 4.28 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı(90 metre).....	95
Şekil 4.29 Yer bloğundaki ısıtma borusunda sıcaklık dağılımı	95
Şekil 4.30 Su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (TKIP'sız 90 metre).....	96
Şekil 4.31 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (TKIP'sız topraktan direkt: 90 metre).....	97
Şekil 4.32 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (TKIP'sız 90 m).....	98
Şekil 4.33 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı (TKIP'sız topraktan direkt: 90 metre)	99
Şekil 4.35 Rüzgar hızı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi.....	101
Şekil 4.36 30 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi	102
Şekil 4.37 60 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi	103
Şekil 4.38 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi	104
Şekil 4.39 TKIP' sız 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi	105
Şekil 4.40 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (30 m).....	106
Şekil 4.41 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (60 m).....	107
Şekil 4.42 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (90 m).....	108
Şekil 4.43 90 metre kuyu devrede iken köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak TKIP'sız değişimi	109

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa
Tablo 2.1 Sırt ve kenar ısı kaybı	16
Tablo 2.2 Kar eritme yüklerine göre önerilen boru merkezleri arasındaki mesafeler	24
Tablo 2.3 Farklı ısıtma sistemlerinin karşılaştırılması	27
Tablo 3.1 Bazı toprak, kaya ve harç/dolgu malzemelerinin ısı özellikleri	31
Tablo 3.2 60 m'deki IDT sonuçları	38
Tablo 3.3 90 m'deki IDT sonuçları	39
Tablo 3.4 U-borusunun ana karakteristikleri	48
Tablo 3.5 Köprü ve yer ısı değiştiricisi'nde kullanılan Px-b borusunun mekanik ve ısı özellikleri.....	49
Tablo 3.6 Çeşitli salamura karışımlarının bazı fiziksel özellikleri	50
Tablo 3.7 Elazığ ilinin 2006-2007 yılı ısıtma sezonundaki iklimsel verileri.....	60
Tablo 4.1 Modelde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	74
Tablo 4.2 Köprü ve yer modelinde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri	81

SİMGELER LİSTESİ

A_r	: Karsız alanının toplam alana oranı, (boyutsuz)
A_f	: Karsız alan, (m ²)
A_s	: Karlı alan, (m ²)
A_t	: Toplam kar eritme alanı, (m ²)
a_s	: Ses hızı,
B	: Sırt kaybı yüzdesi,
$c_{p,buz}$	: Buzun özgül ısısı, J/ (kg K)
$c_{p,su}$	: Suyun özgül ısısı, J/(kg K)
Cu	: Bakır,
Co	: Konstantan,
$C_{p,sa}$	: Su+antifiriz karışımının özgül ısısı, (kJ/kg K)
E	: Euler sayısı,
F_{sc}	: Blok ve bulutlar arasındaki ışıyım alış veriş oranı,
F	: Birincil enerji maliyeti, (YTL/kWh)
G_b	: Batmazlık nedeniyle türbülans üretimi,
G_k	: Ortalama hız gradyenti yüzünden üretilen türbülans kinetik enerjisi,
h	: Tabana dik yaklaşan akım derinliği, (m)
h_{if}	: Karın erime gizli ısısı, (J/kg)
h_c	: Taşınım ısı transfer katsayısı, W/(m ² K)
h_m	: Kütle transfer katsayısı, (m/s)
h_{fg}	: Buharlaşma gizli ısısı (doymuş su buharı ile doymuş hava arasındaki entalpi farkı), (J/kg)
H	: Efektif kuyu derinliği, (m)
I	: Birim tensörü,
k_{hava}	: t_a 'da havanın ısı iletkenliği, W/(m K)
k_{eff}	: Efektif iletkenlik, W/(m K)
k_{hava}	: Blok yakınındaki havanın ısı iletkenliği, (W/m °C)
k	: Türbülans kinetik enerjisi, (m ² /s ²)
L	: Rüzgar yönünde ölçülen bloğun karakteristik uzunluğu, (m)
$\dot{m}_{sa}$	: Kondenserden geçen su-antifiriz karışımının debisi, (kg/s)
M	: Yıllık çalışma maliyeti, (YTL/yıl)
M_t	: Türbülans Mach sayısı,

Nu	: Nusselt sayısı, (boyutsuz)
Pr	: Prandtl sayısı,
Pr_t	: Enerji için Prandtl sayısı,
p	: Atmosfer basıncı, (kPa)
p_r	: Akımdaki bazı referans noktalarındaki mutlak basınç, (N/m ²)
p_{std}	: Standart atmosferik basınç, (kPa)
p_v	: Buhar basıncı, (kPa)
q_0	: Toplam ısı akısı, (W/m ²)
q_s	: Karın sıcaklığını erime noktasına yükseltmek için duyulur ısı akısı, (W/m ²)
q_m	: Gizli ısı akısı, (W/m ²)
q_h	: Karsız yüzeyden taşınım ve ışınlama ısı akısı, (W/m ²)
q_e	: Buharlaşma için ısı akısı, (W/m ²)
Q_a	: Yıllık kar eritme veya bekleme enerji gereksinimi, (kWh/m ²)
Q	: Uygulanan ısı gücü, (kW)
q	: Isı akısı, (W/m ²)
Re_L	: Karakteristik L uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı,
r_b	: Kuyu yarıçapı, (m)
R_b	: Isıl direnç, (K/(W/m))
Re	: Reynold sayısı, (boyutsuz)
Ra	: Ra Rayleigh sayısı, (boyutsuz)
s	: Kar yağışı oranı, (mm/saat)
Sc	: Schmidt sayısı,
S_h	: Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı,
S	: Ortalama gerilme oranının tensörü,
S_k	: Kullanıcı terimi,
T_a	: Hava sıcaklığı, (°C)
T_f	: Sıvı film sıcaklığı, (°C veya K)
T_s	: Erime sıcaklığı, (°C)
T_{MR}	: Çevrenin ortalama ışınlama sıcaklığı, (K)
T_{bulut}	: Bulutların sıcaklığı, (K)
$T_{gök}$	: Açık gökyüzü sıcaklığı, (K)
T_{g-c}	: Giriş- çıkış ortalama akışkan sıcaklığı, (K)
T_{sur}	: Kuyu ilk sıcaklığı, (K)

t	: Zaman, (s)
$T_{sa,\zeta}$	: Kondenser'den köprü/yer modeline geçen su-antifriz sıcaklığı, (K)
$T_{sa,g}$	: Köprü/yer modelinden kondenser'e gelen su-antifriz sıcaklığı, (K)
V	: Blok yakınındaki tasarım rüzgar hızı, (km/saat)
ν_{hava}	: Havanın kinematik viskozitesi, (m^2/s)
ν	: Suyun kinematik viskozitesi, (m^2/s)
W_a	: Çevre havasındaki nem oranı, kg_{buhar} / kg_{hava}
W_f	: Yüzey film sıcaklığında doymuş havanın nem oranı, kg_{buhar} / kg_{hava}
$\dot{W}_1$	: Kondenser sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç, (kW)
$\dot{W}_2$	: Evaporatör sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç, (kW)
$\dot{W}_3$	: Kompresörün şebekeden çektiği güç, (kW)
Y_M	: Genişleme yayılımı terimi (dilatation dissipation)
z	: Rakım, (m)
ρ_{su}	: Suyun yoğunluğu, (kg/m^3)
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti ($5.670 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$)
ρ	: Akışkanın yoğunluğu, (kg/m^3)
ε_s	: Yüzeyin yayıcılığı, (boyutsuz)
ϕ	: Bağlı nem,
σ_k	: Türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısı,
$\rho_{kuru hava}$	: Kuru havanın yoğunluğu, (kg/m^3)
η_b	: Yanma verimi (Isı pompasının ısıtma konumundaki COP'u) (boyutsuz)
η_d	: Enerji dağıtım verimi, boyutsuz (elektrik sisteminde 1 olarak alınabilir)
λ	: Isıl iletkenlik, (W/mK)
α	: Isıl yayılım, (m^2/s)
γ	: Euler sabiti, (0.57)
$\bar{\tau}$	: Gerilme tensörü,
$\dot{m}$	: Debi, (kg/s)
∇	: Gradyent ve diverjans operatörü,
μ_t	: Türbülans viskozitesi,
μ	: Akışkanın viskozitesi, (Ns/m^2)
ΔT	: Sıcaklık farkı, ($^{\circ}C$)

KISALTMALAR

CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
TKIP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası
TID	: Toprak Isı Değiştiricisi
FÜBAP	: Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
ASHRAE	: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerika Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği)
IDT	: Isıl Duyarlılık Testi
TRNSYS	: Zamana Bağlı Sistem İçin Simülasyon Programı (Transient System Simulation)
COP	: Performans (Coefficient of Performance)
BEOWULF	: Birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler
MRC	: Japonya doğal kaynakları geliştirme şirketi

ÖZET

Doktora Tezi

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN YOLLARDAKİ KAR VE BUZU ERİTMEK İÇİN KULLANILMASININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Asım BALBAY

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 116

Kış aylarında güvenli bir yolculuk ve geçiş için özellikle köprü, hastane acilleri ve yokuş gibi bazı kritik bölgelerde oluşan kar birikintisini ve buz oluşumunu önlemek önemlidir. Son zamanlarda kritik yüzeylerdeki kar birikintisini ve buz oluşumunu önlemek için tuzlama, kumlama ve mekaniksel aletleri kullanmaya alternatif bir yöntem, otomatik olarak kontrol edilebilen sulu ve elektrikli kar eritme sistemlerini kullanmaktır. Tuzlama, kumlama ve mekaniksel aletlerin kullanımı yerine bu tür sistemlerin kullanılması ile köprülerin çelik bağlantılarında korozyon oluşumu azaltılabilir ve yolun ömrü artırılabilir.

Toprak kaynaklı ısı pompası yardımı ile köprü ve yer örnek blokları üstündeki karın/buzun eritilmesi için deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. Deneysel sistem, yer altındaki ısıdan faydalanarak karın/buzun eritilmesi için dikey tekli tip toprak ısı değiştiricisi, ısı pompası ve köprü/yer bloklarından oluşmaktadır. Fluent 6.2 yazılımıyla, üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak sayısal çalışma ile deneysel çalışma kıyaslanmıştır. Sondaj ünitelerinin çalıştırılması durumunda, her 30 m sondaj derinliği için yer bloğunun ortalama yüzey sıcaklığındaki artış 0.5 °C olurken, köprü bloğunun ortalama yüzey sıcaklığındaki artış 0.4 °C olarak elde edilmiştir.

Bu tür sistemlerin, ülkemizde büyük kazalara neden olan yollardaki kar/buz oluşumunun önlemesi için kullanılması ve bu tür projelerin hükümetler tarafından desteklenmesi gerekir.

Anahtar Kelimeler: Toprak kaynaklı ısı pompası, kar, buz, eritme, Fluent, HAD, köprü, yol, deneysel, sayısal.

ABSTRACT

PhD Thesis

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF USING GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM FOR MELTING SNOW AND ICE ON ROADS

Asim BALBAY

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

2007, Page: 116

Preventing snow accumulation and ice formation on roads, especially on some critical sections including bridges, emergencies of hospital and ramps etc. is important to improve transportation safety in winter months. Recently, an alternative method to applying salting, sanding and using mechanical devices is to use automatically controlled hydronic and electrical snow melting systems to prevent ice formation and melting snow/ice on critical surfaces. Instead of salting, sanding and using mechanical devices such systems can reduce the rate of corrosion drastically bridge decks and so extend the life of road.

Experimental and numerical study was carried out for melting snow/ice on bridge and ground prototype slabs by ground source heat pump. The experimental system is composed of an underground thermal utility for snow/ice melting by using vertical ground heat exchanger, heat pump and bridge/ground slabs. Experimental and numerical study had been compared by using three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) models with Fluent 6.2 software. In case of using boreholes, increasing of average surface temperature in bridge slab was obtained as 0.4 °C for each depth of 30 meters while increasing of average surface temperature in pavement slab was obtained as 0.5 °C for each depth of 30 meters.

These type systems should be used for preventing formation of snow/ice on roads leads to numerous dangerous accidents in our country and these type projects should be supported by the governments.

Keywords: Ground source heat pump, snow, ice, melting, Fluent, CFD, bridge, road, experimental, numerical.

1. GİRİŞ

Yollardaki kar veya buz oluşumları sürücüler ve yayalar için tehlikelidir. Bilhassa köprü döşemelerinin alt yüzeyleri toprakla temas halinde olmadığı için dış havaya maruz kaldığından buralarda buzlanma daha fazla görülmektedir. Kar veya buzdan dolayı yollarda, köprülerde, kaldırımlarda ve hava alanlarında insanların ölümüne, yaralanmasına ve maddi hasarlara sebep olan tehlikeli kazalar meydana gelmektedir. 1970'li yılların sonlarına doğru yapılan bir araştırmaya göre Amerika Birleşik Devletlerinde kar veya buzdan dolayı yılda 25000 kaza meydana geldiği tespit edilmiştir [1]. Ayrıca, çeşitli yük ve maddelerin sevkiyatının kar veya buzdan dolayı zorlaşması, ülke ekonomisine büyük ölçüde zarar vermektedir. Yolcuların daha güvenli bir şekilde yolculuklarını yapabilmeleri, yayaların tehlikesiz bir biçimde bir yerden bir yere gidebilmeleri ve çeşitli yüklerin emniyetli bir şekilde, zamanında sevk edilebilmesi için karın veya buzun asfalt yüzeylerden kaldırılması gerekir. Bu amaçla geleneksel yöntemler olan kimyasal maddelerin ve mekaniksel aletlerin kullanımı geçmişte olduğu gibi günümüzde de oldukça yaygındır [2]. Günümüzde kullanılan kimyasal maddeler sodyum klorür, kalsiyum klorür ve magnezyum klorür tuzlarıdır. Donma noktası düşük olan bu tuzlar, kar veya buz ile temas haline geçtiğinde, oluşan karışımın erime noktasını aşağıya çekerek karın veya buzun erimesine neden olurlar. Ancak, bu kimyasal maddelerin bazı olumsuz etkileri var: 1) kimyasal maddelerin bazıları hava sıcaklığının $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki ortamlarda etkisini göstermez, 2) fırtınalı günlerde atılırsa tuz fırtınasının etkisiyle eritilmek istenen yüzeylerden uzaklara taşınır, 3) asfalt ile kimyasal etkileşime girerek asfaltın yapısını bozar, 4) seyir halindeki araçların metal aksamını ve köprü döşemesindeki çelik bağlantıları korozyona uğratar. Mekaniksel aletler kullanarak yollardaki karın veya buzun kaldırılmasında ise kar temizleme makinelerinin titreşimi ve mekaniksel aletlerin kullanımı yolun yapısına zarar verir ve yüksek bakım maliyetine yol açar.

Günümüzde artık klasik yöntemlerin yerine daha yeni yöntemlerle yolun yapısına zarar vermeden kar veya buzun yollardan kaldırılmasına çalışılmaktadır. Yeni yöntemlerden en ilgi çeken toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) veya jeotermal ısı pompaları yardımı ile karın veya buzun eritilmesidir. TKIP sistemi toprağın içindeki ısının kararlı değişmesi ve soğuk iklimlerde performansının fazla düşmemesi nedeniyle enerjinin kullanımında daha etkili sonuçlar ortaya çıkarır [3]. Toprağın, birkaç on metre derinlikte yıl boyunca sıcaklığı yaklaşık $8-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında sabit kalır. TKIP'lı sulu sistemde toprağa yatay veya dikey tasarlanmış borular döşenir. Yüzeye çıkarılan ısı TKIP yardımı ile yükseltilerek ısıtılması istenilen yüzeye nakledilir. Dünyada, yollardaki karın veya buzun eritilmesi dışında başka amaçlarla da kullanılan bu sistemlerin, yollardaki kar veya buz eritilmesinde kullanılması için ülkemizde de yaygınlaştırılması

gerekmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Japonya gibi ülkelerde yollardaki kar veya buzu eritmek için yeni yöntemler araştırılmasına rağmen Türkiye’de geleneksel yöntemler dışında bugüne kadar yeni bir yöntem üzerinde çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada, TKIP sisteminin yollardaki kar veya buzu eritmek için kullanılmasının deneysel ve teorik olarak araştırılması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada düşey toprak ısı değiştiricisinin yerleştirilmesi için 30, 60 ve 90 metre derinliğinde ve 160 mm çapında üç kuyu kazılmıştır. Kazılan bu kuyulara U-borusu döşenmiştir. Yerden yüksekliği 2 metre olan ve I tipi demirden yapılmış bir sehpanın üzerine köprü modeli olarak bir beton blok hazırlanmıştır. Ayrıca köprü modeli ile aynı ölçülerde bir beton blok da zemin için hazırlanmıştır. Dikey tip tekli toprak ısı değiştiricisi (TID) borularının çevre havaya açık kısımları, köprü ve yer bloğu ısıtma borularının gerekli yalıtımı yapıldıktan sonra 40 cm derinlikte toprağa gömülerek TKIP sistemi ile bağlantısı yapılmıştır. Antifriz+su (propilen-glikol) çözeltisinin köprü bloğuna giriş ve çıkış debileri, blok içi ve üst yüzeylerdeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Teorik çalışmada Fluent 6.2 programı kullanılarak toprak, yer ve köprü modelleri oluşturulmuştur. Toprak modelinde sondaj deliğinde oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Köprü ve yer modellerinde üstünde karın bulunduğu kütledeki (blok) ortalama sıcaklık dağılımları, su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıkları her bir kuyu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar teorik çözümler ile kıyaslanması yapılmıştır.

Bu tez, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Yönetim Birimi tarafından 1154 no’lu proje kapsamında deneysel çalışmalar için desteklenmiştir.

1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Son yıllarda yollardaki kar veya buz oluşumunu önlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca verilmiştir.

1981 yılında yapılan çalışmada Yen [4], karın ve buzun farklı ısı-fiziksel özelliklerini belirlemek için bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada aşağıdaki özellikleri incelemiştir:

- Sıcaklığın düşmesi ile buzun yoğunluğunun değişimi,
- Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak buzun lineer genleşme katsayısı ve buzun sıkışabilirliği,
- Yoğunluk ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak karın zamanla yoğunluğunun değişimi,
- Hidrostatik basıncın bir fonksiyonu olarak karın dengeli bir şekilde erime sıcaklığının değişimi,
- Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak sabit basınçta ısı kapasitesinin belirlenmesi,
- Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gizli erime ısısı,
- Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak buzun ısı iletkenliği,
- Yoğunluğun bir fonksiyonu olarak karın ısı iletkenliğidir.

1986 yılında yapılan çalışmada Colbeck, karın fiziksel özellikleri ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada karın fiziksel özelliklerini sekiz sınıfta toplamıştır. Bu yeni sınıflandırma 1990 yılında uluslararası bir sınıflandırma olarak kabul edilmiştir [5]. Yapılan sınıflandırmada kar, sekiz fiziksel karakteristiğiyle ele alınmıştır. Bu özellikler: karın yoğunluğu, tane şekli, tane büyüklüğü, içerdiği su miktarı, saflığı, dayanıklılığı, katılığı ve sıcaklığıdır. Bu karakteristiklerin her biri kendi özelliklerini gösteren bir yapıya sahip olmalarına rağmen, tane şeklinin kendisini açıklayıcı özelliği yoktur. Tane şekli, kar yağışının durumuna ve geçirdiği zamana bağlı olarak değişir. Çünkü, kar donma veya erime olayına maruz kaldığında, kristal şekli ilk özelliğinden çok daha farklı olmaktadır.

1998 yılında Iwamoto ve diğerleri [6], yaptığı çalışmada, topraktaki ısı enerjisiyi kullanarak yollarda kar ve buzun olduğu zamanlarda karı/buzu eritmek için bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada toprağın altında bulunan ısı enerjisini yüzeye çıkarmak için kuyular kazılmış ve bu kuyulara U-boruları döşenmiştir. Topraktaki ısı enerjisi, borulardan antifriz+su karışımı bir sirkülasyon pompası yardımıyla dolaştırılarak yüzeye çıkarılmıştır. Kurulan sistem ile yaz aylarında kuyularda ısı enerjisi depolanabilmekte, kış aylarında ise depolanan bu enerji sirkülasyon pompaları ile yüzeye çıkarılabilmektedir. Kış aylarında bile

güneşin olduğu zamanlarda güneş ısısı toprakta depolanabilmektedir. Uygulamada tüketilen enerji yalnızca sirkülasyon pompası için kullanılan elektrik enerjisidir. 26 m²'lik bir yüzey alanı için ölçümler yapılmıştır. Japonya'nın Hokkaido üniversitesinde yapılan bu deneysel çalışmada deney düzeneğinde kullanılan elemanlar tanıtılmış ve alınan sonuçlar Hiroşima'da kurulu benzer sistem ile karşılaştırılmıştır. Her iki sistem için de kullanılan dikey toprak ısı değiştiricisi için kuyu derinliği 100 metredir. Fakat Hokkaido üniversitesinde çiftli boru kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmada; toprakta ısı ile elde edilen 6-10 °C sıcaklık Hiroşima'daki sistem ile hemen hemen aynı sonuçları içermektedir. Giriş değerleri her iki sistem için aynı olmasına rağmen az derecedeki farklılığın sebebi Hokkaido şehrinin, Hiroşima şehrine göre kutuplara daha yakın olmasıdır.

1999 yılında yapılan çalışmada Jordan ve diğerleri [7], karın geçirgenliği ve kılcal boru yüksekliği arasındaki ilişkiyi hem deneysel hem de teoriksel olarak araştırmıştır. Kılcal boru basıncı, doymuş basınç eğrisi içindeki uygun parametrelerin kullanılması ile gözenek yapısına ilişkilendirilmiştir. Ancak kar yumuşak ve az bir kuvvet ile kolay bir şekilde ezildiğinden dolayı bu eğrileri ölçmek çok zordur. Bu nedenle, kılcal yükseklik ölçü değişkeni olarak seçilmiştir. Gözenekli ortamdaki çoğu denklemler kar esas alınarak tanımlanamamaktadır. Çünkü kar suyla temas ettiğinde tane büyüklüğünü ve şeklini hızlı bir şekilde kaybeden bir yapıya sahiptir. Jordan, Darcy'nin [8] tanımlamış olduğu yöntemi kullanarak gözeneklilik ve en yüksek doyma noktasının bir sonucu olarak tahmin edilen geçirgenlik arasında bir ilişki kurmaya çalışmıştır. Darcy'nin yöntemi düşük Reynolds sayısından dolayı başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Jordan, ayrıca 1970 yılında Shimiz tarafından geliştirilen kar tanesi çapının ve kar yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak karın geçirgenliğini de açıklamıştır. Bu iki fonksiyon en yüksek doyma noktasının ve porizitenin bir fonksiyonu olarak kar tanesi çapı için tek bir denklem haline getirilmiştir. Bu denklem deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ölçme hataları ve yapı farklılıklarından dolayı hataların olduğu sonucuna varılmıştır.

2000 yılında Spitler ve Ramamoorthy [9] yaptıkları çalışmada, jeotermal ısı pompası kullanarak köprüde oluşan buzun eritilmesini araştırmışlardır. Köprü ısıtma sisteminin simülasyonları iki modelleme bileşenine (TRNSYS ve HVACSIM+) bağlı olarak geliştirilmiştir. Isıtma sistemi Amerikada bulunan 215 metre uzunlukta ve 12 metre genişlikteki bir köprüye uygulanmıştır. Bu köprü (Interstate Highway 40, I-40) Amerika'da eyaletler arası hizmet veren bir köprüdür. Kurulan sistemde 30 ton soğutma kapasiteli 16 ısı pompası ve her biri 76 metre derinliğinde ve 125 mm çapında 250 kuyu kullanılmıştır. Sistem yazın ısını toprağa, kışın ise köprü yüzeyine nakletmektedir.

2002 yılında Liu ve diğerleri [10], tarafından yapılan çalışmada köprü bloğunda oluşacak buzun önlenmesi için bir sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Köprü sisteminin

simülasyonu için köprüye serilen sıcak su boruları, sirkülasyon pompası, TID ve ısı pompası kullanılmıştır. Akışkanın akışı ve ısı transfer problemlerinin simülasyonu için HVACSIM+ kullanılmıştır. Köprü yüzeyindeki buzun oluşumunu engellemek için yapılan tasarımlarda, öncelikle oluşacak hava şartları altında uzun süreli bir performans değerlendirilmesinin yapılması gerekecektir. Böyle bir sistemin performansı için bir simülasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada ele alınan sistem, sulu sistemin kullanıldığı bir köprü ve ısı kaynağı olarak dikey tip toprak ısı değiştiricisine sahip ısı pompası sistemidir. Yapılan simülasyonun doğruluğu deneysel çalışma için kurulmuş köprü sisteminden elde edilen bilgiler sonucuna göre yapılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen veriler kıyaslanmıştır.

Japonya’da 2001-2002 yılları arasında Akita Üniversitesi ve doğal kaynakları geliştirme şirketi (MRC) tarafından, TKIP sistemi ile yollardaki kar ve buzu eritmek için bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 50-100 metre derinlikte ve 15 cm çapında sondaj kazılmış ve kuyulara 1" polietilen U borusu yerleştirilmiştir. Borular döşendikten sonra kuyudaki borunun etrafı; çimento, silis kum vb. ile doldurulmuştur. Sistemde, su-su ısı pompası sistemi kullanılmıştır. Sistemin mekanik ve ekonomik verimini test etmek için 3 x 2 m boyutlarında hazırladıkları bloklar ile beraber TKIP sistemi, boyler sistemi ve elektrikli sistemi kurmuşlar ve kurdukları bu sistemleri eş zamanlı olarak çalıştırmışlardır. Test süresince toprak ısı değiştiricisinin (TID) sıcaklığı, sirkülasyon pompalarında dolaşan su+antifriz karışımının giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Sonuç olarak, TKIP sisteminin enerji tüketimi elektrikli sisteme göre 1/3 oranında daha az olduğu görülmüştür [11].

2006 yılında yapılan çalışmada, Liu ve diğerleri [12], kar eritmek için kurulmuş bir deney düzeneğinde sayısal bir çalışma yapmışlardır. Oklahoma State üniversitesi tarafından üzerindeki karın ve buzun sıcak sulu olarak eritileceği bir köprü inşa edilmiştir. İnşa edilen bu köprü 18.3 metre uzunluğunda ve 6.1 metre genişliğindedir. 19 mm çaplı polietilen borular, 89 mm derinliğe, merkezleri arası 0.3 metre olacak şekilde serilmiştir. Isıtma akışkanı olarak kütlece % 39 konsantrasyonlu Propilen glikol çözeltisi kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinde 60 adet termistör köprü bloğunun farklı bölgelerine yerleştirilmiştir. Akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığı ile debisi sırasıyla termistör ve debimetre ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde, akışkanın giriş sıcaklığı 54 °C dolaylarında ve ortalama köprü yüzey sıcaklığı karlanma ve buzlanmanın olduğu zamanlarda 4.4 °C’dir. Kurulmuş bu deney düzeneği için yapılan sayısal çalışmada, ısıtma sınır şartları ve zamana bağlı olarak değişen hava bilgisi programa girilerek kar eritme işlemi süresince karın, buzun ve havanın durumları araştırılmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığı ve kütsel debisinin yanında hava bilgisi programa girilerek akışkanın çıkış sıcaklığı, ısıtılmış yüzeydeki kar örtüsünün bulunma miktarı ve zeminin üst yüzeyinin sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır.

2006 yılında yapılan çalışmada, Liu ve diğerleri [13] tarafından iki boyutlu ve zamana bağlı model için sonlu farklar metodunu kullanarak sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, ısıtılması düşünülen yüzeyin sayısal modeli ve karın erimesi esnasında yüzeyde oluşacak olaylar tanımlanmıştır. Kar tabakası kuru kar ve sulu kar tabakası olarak iki kısımda incelenmiştir. Akışkan giriş sıcaklığı ve hava verisi oluşturulan modele girilerek yüzeyde zamana bağlı oluşan olaylar belirlenmiş ve yüzey sıcaklığı hesaplanmıştır.

2. KAR VE BUZ ERİTME İLE İLGİLİ ESASLAR

2.1. Kar ve Buz Oluşumu

Bulutları meydana getiren su buharı 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda donar. Bu donma sonucu su buharı iğne şeklinde buz kristalleri halini alır. Bunların birbirleri ile birleşmeleri neticesinde de düzgün altıgen şeklinde kar kristalleri meydana gelir. Kar kristallerinin bozulmadan yere ulaşmaları için geçtikleri hava tabakalarının sıcaklıklarının 0 °C'nin altında olması gerekir. Aksi takdirde yeryüzüne yağmur olarak yağar [14].

Çapları 2-4 mm, ağırlıkları ise yaklaşık 0.005 gram olan kar tanecikleri havanın gösterdiği direnç sebebiyle süzülerek (limit hızla) yere inerler. Bu inme sırasında tanecikler birbirlerini ittiklerinden yapışmazlar. Özelliklerini koruyarak yere inerler. Bunlar güneş ışığını tamamen yansıttıkları için beyaz olarak görülürler. Kar yağışı genellikle hava sıcaklığı -4 °C ile -20 °C arasındayken olur. Bu yağış, sıcaklık sıfırın altında birkaç derece olduğunda ağır nemli, ebatları bir santimetreye ulaşan parçalar halinde gerçekleşir. Atmosfer ile toprağın sıcaklıkları eşit olursa yüzeye ulaşan kar hemen erimez. Toprak sıcaklığı atmosfer sıcaklığının üzerinde ise, yere düşen kar kısa sürede erir. Yer yüzüne kar yağması için atmosferin alt katmanlarının sıcaklığının 0 °C'nin altında olması yeterlidir, bu karın yere düşmeden önce erimesini önler.

Kar; su, su buharı ve buz kristallerinden oluşan geçirgen bir malzemedir. Karın erimesi kar ve buz tabakasının en alt tabakasından başladığında, eriyen karın birazı yüzey üzerinde kalır ve bölümsel olarak karın ıslanmasına neden olur [15].

Dünya üzerinde bir bölgede kar yağışı olma ihtimali, o bölgenin ekvatorundan uzaklık ve deniz seviyesinden yüksekliği ile doğru orantılıdır. Buna rağmen ılıman bölgelerin kara iklimi görülen kısımlarında, ekvatorundan uzaklık ve denizden yükseklik şartları yeterli durumda olmasa bile kar yağışı görülür. Yapılan araştırmalarda bütün yağışların altı veya sekizde birinin kar olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır. Karın, tarım toprağını koruması ve nemli tutmasında önemi büyüktür. Kar, yeryüzü ve yeraltı su rezervlerinin ana kaynağıdır [16].

Kar, -8 °C'de, bitkilerin üzerinde ince bir hava tabakası bırakarak, bu bölgeyi 0 °C olacak şekilde örter. Kış boyunca toprak ve bitkileri donmaktan koruyan kar, ilkbaharda sıcaklığın artmasıyla eriyerek nehirlerle ulaşır. Ayrıca kışın yağın ve dörtte üçü üst kısımlarda kalan kar, yaz kuraklığına karşı da toprağı ve bitkileri korumuş olur. Karda bulunan amonyak, kar erimesiyle birlikte toprakta kalır. Bu amonyak, azot bakterileri tarafından kalsiyum nitrat gibi azot tuzlarına çevrilerek bitkilerin azot ihtiyacını karşılar [16].

Kar iki ayrı tabaka halinde düşünülür. Doygun tabaka olarak “sulu” ve doygun olmayan tabaka olarak “kuru kar” terimleri ele alınır. Karla kaplı yüzey, bu tabakaların değişen kombinasyonları olarak göz önüne alınabilir. Bu tabakaların yalnızca biri veya diğeri gerçek şartlarda mevcut olabilir. Erime sıcaklıkları altındaki durumlarda erime gerçekleşmez. Bu kar yüksek oranda geçirgen (düşük yoğunluklu) buz matrisidir. Erime meydana gelirse kar örtüsünün daha alttaki kısmı ıslanır. Bu durum “sulu kar” şartı olarak ifade edilir. Sulu tabaka donma noktasında suyla doygun hale gelmiş benzer geçirgen matris olarak kavramlaştırılır. Kar eritmenin daha sonraki aşamalarında karın derinliği, tamamen sulu ince bir tabaka meydana gelene kadar azaltılır. Sıvı bir denge oluşur. Bu şart “yalnızca sulu” olarak ifade edilir. Erimiş kar, kapiler hareketten dolayı ele alındığı zaman sulu kısım kar örtüsünün altında şekillenir. Eritme işlemleri olarak, bu kar tabakasının derinliği maksimum yüksekliğe ulaşmaya kadar artar. Bu maksimum yükseklik kapiler ve yerçekimi kuvvetlerinin dengede olduğu noktada belirlenir. Bu yükseklik denge yüksekliğidir [7, 15, 17].

2.2. Kar ve Buz Eritmek için Gerekli Isıl Hesaplar

Bu bölümde verilen denklemler karı ve buzu eritmek için gerekli ve yalnızca bloğun yüzeyindeki enerji dengesini esas alan denklemlerdir. Bloktaki ısı iletimleriyle alakalı değildir. 1952 ve 1956 yıllarında Chapman [18, 19], 1994 yılında Kilkis [20] ve 1999 yılında Ramsey [21] çalışmalarında bu denklemleri kullanmışlardır. Hazırladıkları modeller kar eritme sistemlerinin uygulamalarında kaynak olarak alınır.

Karı eritmek için gerekli ısı, beş adet atmosferik faktöre bağlıdır [22].

- Kar yağışı miktarı,
- kar yağışı sırasında havanın kuru termometre sıcaklığı,
- nemlilik,
- rüzgar hızı,
- görünür gökyüzü sıcaklığıdır.

Kar eritme bloklarının boyutları, yüzeydeki ısı ve kütle transferi miktarını etkiler. Ayrıca, diğer faktörler olan sırt ve kenar kayıpları tam tasarımda dikkate alınmalıdır.

ASHRAE el kitabında başlıca iki temel sınırlama mevcuttur. Birincisi bloğun yüzeyinde zamana bağlı olmayan ısı dengesinin hesaplanmasıdır. Böylece yapılan çalışmanın ve havanın zamana bağlı değişimi dikkate alınmamaktadır. İkincisi ise bloğun yüzey sıcaklığının sabit olduğu varsayılır. Boruların döşemeye yerleştirilmesinin etkileri dikkate alınmaz. Kar eritme

sistemlerinde ısı kütlesi olan bir malzemede ısıtma elemanları mevcuttur. Karın veya buzun eritilmesi için ısı akışının belirlenmesinde zamana bağlı oluşan etkiler ihmal edilmemelidir [23]. Zamana bağlı olmayan hesaplamalarda, karın veya buzun eritileceği bloktaki hava durumunun değişimi ve bloğun yapısı dikkate alınmaz. Zamana bağlı olmayan çözümlerde bloğun ısıtma elemanlarına ısı girişi ile bloğun üst yüzeyine ısı akışı arasında bağıntı bulunur.

2.2.1. Isıl Denge

Isı ve kütle transfer katsayıları kar eritme bloğunun karakteristik boyutlarının bir fonksiyonudur. Yüzeydeki karı/buzu eritmek için gerekli toplam ısı akısı zamana bağlı olmayan enerji dengesini kullanan Eşitlik 2.1 ile hesaplanır. Her bir terimin detaylı tanımı ileride yapılacaktır.

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_h + q_e) \quad (2.1)$$

Burada;

q_0 toplam ısı akısı, (W/m²)

q_s karın sıcaklığını erime noktasına yükseltmek için duyulur ısı akısı, (W/m²)

A_r karsız alanının toplam alana oranı (boyutsuz)

q_m gizli ısı akısı, (W/m²)

q_h karsız yüzeyden taşınım ve ışınlama ısı akısı (W/m²)

q_e buharlaşma için ısı akısı (W/m²)

2.2.2. Karsız Alan Oranı

Duyulur ve gizli ısı akısından dolayı ısı yükleri, kar yağışı sırasında bloğun tümüne etki ederler. Diğer yandan bloğun yüzeyinden ısı ve kütle transferi miktarları, bloğun yüzeyinde kar olup olmamasına bağlıdır. Blok yüzeyinde kar birikintisinin olması, yüzeyde buharlaşma ve ısı kayıplarını kısmen engelleyerek izolasyon görevi görür. Karın izolasyon etkisi karlı veya karsız alanın büyüklüğüne bağlıdır. Karın blokta belirli bir kısım alanı kaplaması ile izolasyon etkisini, ısı kaybı ve buharlaşmanın olmadığı karlı alan veya eşdeğer kaplı alan olarak düşünmek uygun olacaktır. Buna karşılık, karsız bir alanın da düşünülmesi gerekir ve alanın ince bir sıvı film

tabakasıyla tamamen kaplı olduğu ve mevcut çevresel koşullarda hem ısı hem de kütle transferinin maksimum miktarda ortaya çıktığı düşünülür. Karsız alanın (A_f) toplam alana (A_t) oranı, kar eritme sistemlerinin temel tasarım parametresidir. Bu parametreye göre kar eritme sistemi sınıflandırılır.

$$A_r = \frac{A_f}{A_t} \quad (2.2)$$

A_r karsız alanın toplam alana oranı (Boyutsuz)

A_f karsız alan (m^2)

A_s karlı alan (m^2)

$$A_t = A_s + A_f = \text{Toplam alan (m}^2\text{)}$$

$$0 \leq A_r \leq 1$$

Kar eritme sistemlerinin tasarım parametrelerine göre aşağıdaki sınıflandırma yapılır [18,24].

- **Sınıflandırma 1** (Konutsal alanlar): Kar tabakasının yüzeyi ısı ve buharlaşma kayıplarından koruyacak bir yeterlikte olduğu fakat bu tabakanın altında kar yağışı ile toplanan miktara eşit bir eritme bulunduğu anlamına gelmektedir. Yüzeyde ısı ve buharlaşma kayıplarını önlemek için uygun bir kar kalınlığı ile yüzey örtülmelidir ($A_r = 0$). Sistemin kar yağışından sonra yağın karı eritmesi düşünülür. Bu tür alanlara yürüyüş alanları veya otoyolları vb. örnek olarak verilir.
- **Sınıflandırma 2** (Ticari alanlar): Yüzeyin % 50'sinin kar yağışı süresince karla kaplanmasına izin verilir ($A_r = 0.5$). Bloğun tüm yüzeyinde veya bir kısmında bloğun yarısının izole edilmiş olması gibi işleyecek ince bir kar tabakası ile kaplı olması anlamındadır. Karsız alanın ince bir sıvı filmiyle tamamen kaplı olduğu düşünülür. Böylece hem ısı hem de kütle transferi varolan çevre şartlarında maksimum oranlarda gerçekleşir. Bu tür alanlara yaya kaldırımı, otoyolları, hastanelerdeki merdivenler vb. örnek olarak verilir.

- **Sınıflandırma 3** (Endüstriyel alanlar): Yüzeyde karın birikmesini önlemek için sistem yeteri kadar hızlı eritmelidir ($A_r = 1$). Bu türe örnek olarak ise hava alanları, hastanelerin acil girişleri, oto yollarda ücret ödeme bölgeleri, köprüler vb. verilir.

2.2.3. Duyulur ve Gizli Isı Akısı Denklemleri

Duyulur ısı akısı (q_s), yağın karın sıcaklığını erime noktasına kadar yükseltmek ve kar eridikten sonra sıvı filmin sahip olduğu sıcaklığa (T_f) yükseltmek için gerekli ısı miktarıdır. Karın atmosferik sıcaklıkta (T_a) yağdığı düşünülür. Gizli ısı akısı (q_m), karın katı halden sıvı haline geçmesi sırasında emdiği veya dışarıya verdiği ısı miktarıdır. Karı eritmek için gerekli ısı akısıdır. Zamana bağlı olmayan şartlar altında hem q_s hem de q_m kar yağışı oranı (s) ile doğru orantılıdır.

2.2.3.1. Duyulur Isı Akısı

Duyulur ısı akısı (q_s), Eşitlik 2.3 ile hesaplanır. Karın T_a sıcaklığında olduğu düşünülür. Aşağıdaki denklem'deki c_1 katsayısı 3.6×10^6 olarak alınır.

$$q_s = \rho_{su} \cdot s \cdot [c_{p,buz} (T_s - T_a) + c_{p,su} (T_f - T_s)] / c_1 \quad (2.3)$$

$c_{p,buz}$ buzun özgül ısısı, J/ (kg K)

$c_{p,su}$ suyun özgül ısısı, (J/kg K)

s kar yağışı oranı, (mm/saat)

T_a hava sıcaklığı, (°C)

T_f sıvı film sıcaklığı, (°C)

T_s erime sıcaklığı, (°C)

ρ_{su} suyun yoğunluğu, (kg/m³)

c_1 $1000 \text{ mm/m} \times 3600 \text{ s/saat} = 3.6 \times 10^6$

Suyun yoğunluğu, buzun özgül ısısı ve suyun özgül ısısı söz konusu sıcaklık aralığında nispeten sabit olup 0 °C'deki değerler dikkate alınır. Sıvı film sıcaklığı genellikle 0.56 °C olarak alınır [22, 25].

2.2.3.2. Eritme Isı Akısı

Isı akısı (q_m) karı eritmek için gereken ısıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$q_m = \rho_{su} \cdot s \cdot h_{if} / c_1 \quad (2.4)$$

h_{if} karın erime gizli ısısı, (J/kg)

2.2.4. Yüzeyde Oluşan Taşınım, Işınım ve Buharlaşmadan Dolayı Isı Kayıpları

Uygun ısı ve kütle transfer denklemleri, bloktaki karsız alan oranına göre yazılabilir. Film sıcaklığında (T_f) bulunan karsız yüzeyde ısı çevreye ve kütle buharlaşmakta olan sıvı filmi kütesine transfer edilir. Isı akısı (q_h), T_a sıcaklığında hava ortamına taşınım kayıplar ve ortalama ışıınım sıcaklığında (T_{MR}) çevreye ışınsal kayıplar içerir. Taşınım ile ısı transfer katsayısı, kar eritme yüzeyinin karakteristik boyutlarının ve rüzgar hızının bir fonksiyonudur. Bu ısı transfer katsayısı aynı zamanda havanın değişik kar yağış sıcaklıkları aralığında çok az değişen termodinamik özelliklerinin de bir fonksiyonudur. Ortalama ışıınım sıcaklığı: hava sıcaklığına, bağıl neme, havanın bulutlu olup olmamasına, bulut yüksekliğine ve karın yağıp yağmamasına bağlıdır [21, 22, 25].

Buharlaşma için gerekli ısı akısı (q_e), buharlaşma gizli ısısı ile buharlaşma miktarının çarpımına eşittir. Buharlaşma miktarı, kar eritme bloğunun yüzeyindeki ıslaklık ile çevre sıcaklığına karşı gelen buhar basınçların farkından kaynaklanır. Kütle transferi katsayısı: rüzgar hızının, bloğun karakteristik boyutlarının ve çevre havasının termodinamik özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Uygun ısı akısı (q_h), aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$q_h = h_c (T_f - T_a) + \sigma \epsilon_s (T_f^4 - T_{MR}^4) \quad (2.5)$$

h_c Türbülanslı akış için taşınım ile ısı transfer katsayısı, W/(m² K)

T_f sıvı filmi sıcaklığı, K

T_{MR} çevrenin ortalama ışıınım sıcaklığı, K

σ Stefan-Boltzmann sabiti ($5.670 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$)

$\mathcal{E}_s$ yüzeyin yayıcılığı, boyutsuz

Blok üzerinden taşınım ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$h_c = 0.037 \left(\frac{k_{hava}}{L} \right) Re_L^{0.8} . Pr^{1/3} \quad (2.6)$$

k_{hava} T_a 'da havanın ısı iletkenliği, (W/m K)

L rüzgar yönünde ölçülen bloğun karakteristik uzunluğu, m

Pr havanın Prandtl sayısı, (Pr=0.7, hava için)

Re_L karakteristik L uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı

$$Re_L = \frac{VL}{v_{hava}} c_2 \quad (2.7)$$

V blok yakınındaki tasarım rüzgar hızı, (km/saat)

v_{hava} havanın kinematik viskozitesi, (m^2/s)

c_2 $1000 \text{ m/km} \times 1 \text{ saat}/3600 \text{ s} = 0.278$

Kar eritme yüzeyi yatay değilse, taşınım ısı transfer katsayısı farklı olabilirken bu farklılık bir çok uygulama için önemsenmeyebilecek düzeydedir [22, 25].

Eşitlik (2.6) ve (2.7)'den türbülanslı taşınım ısı transfer katsayısının $L^{-0.2}$ 'nin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Bu bağıntıdan, kısa uzunluklu kar eritme bloklarının uzun kar eritme bloklarından daha yüksek taşınım ısı transfer katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Tasarımda en kısa blok uzunluğu kullanılmalıdır (uzun dar karayolu veya kaldırımlar için bu yolların genişliği blok uzunluğu olarak kullanılır) [21, 22].

Eşitlik 2.5'de kullanılan “Ortalama Işıınım Sıcaklığı (T_{MR})”, kar eritme bloğu çevresinin eşdeğer cisim sıcaklığıdır. Kar yağışı şartları altında tüm çevre ortamın hava sıcaklığına yakındır ($T_{MR}=T_a$). Kar yağışı olmadığında ($A_r < 1$ için kar yağışından sonra ve yağış olmadığından işlem yapılmadığı süresince), ortalama ışıınım sıcaklığı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$T_{MR} = [T_{bulut}^4 F_{sc} + T_{gök}^4 (1 - F_{sc})]^{1/4} \quad (2.8)$$

F_{sc} blok ve bulutlar arasındaki ışıınım alış veriş oranı

T_{bulut} bulutların sıcaklığı, K

$T_{gök}$ açık gökyüzü sıcaklığı, K

Açık gökyüzünün eşdeğer cisim sıcaklığı öncelikle çevresel hava sıcaklığı ile atmosferdeki nemin bir fonksiyonudur. Açık gökyüzü sıcaklığı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [22, 25].

$$T_{gök} = T_a - (1.1058 \times 10^3 - 7.562T_a + 1.333 \times 10^{-3}T_a^2 - 31.292\phi + 14.58\phi^2) \quad (2.9)$$

T_a çevre sıcaklığı, K

ϕ 10 yıllık aralıklar ile tipik hava ölçümlerinin yapıldığı yükseltideki bağıl nemdir.

Gökyüzünün bulutlu kısmındaki sıcaklık T_{bulut} olarak düşünülür. Bulutların 3000 metre yükseltide olduğu varsayılır. 3000 m yükseklikteki bulutların sıcaklığı, yükseklerle çıkıldıkça hava sıcaklığın düşme miktarının bulut yüksekliği ile çarpılmasından elde edilen değerin, atmosferik sıcaklık T_a 'dan çıkarılması ile hesaplanır. Hava sıcaklığının yükseltiyle düşme miktarı her 1000 metre yükselti için 6.4 °C'dir. Buna göre 3000 metre yükseltideki sıcaklık aşağıdaki denklem ile hesaplanır [25]

$$T_{bulut} = T_a - 19.2 \quad (2.10)$$

Çoğu şartlar altında bulutların sıcaklığını yaklaşık olarak bulma metodu kabul görür. Ancak atmosferde çok yüksek oranda nem var ise Eşitlik 2.9 kullanılarak bulunan açık bir gökyüzü sıcaklığı, Eşitlik 2.10 ile bulunan bulut sıcaklığından daha yüksek çıkabilir. Böyle bir durumda bulutların sıcaklığı (T_{bulut}) açık gökyüzü sıcaklığına ($T_{gök}$) eşit alınır [25].

Islak bir yüzeyden suyu buharlaştırmak için gerekli ısı akısı (q_e) aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$q_e = \rho_{kuru hava} h_m (W_f - W_a) h_{fg} \quad (2.11)$$

h_m kütle transfer katsayısı, (m/s)

W_a çevre havasındaki nem oranı, kg_{buhar} / kg_{hava}

W_f yüzey film sıcaklığında doymuş havanın nem oranı, kg_{buhar} / kg_{hava}

h_{fg} buharlaşma gizli ısı, (j/kg)

$\rho_{kuru hava}$ kuru havanın yoğunluğu, (kg/m³)

Kütle transfer katsayısı ısı ve kütle transferleri arasındaki bir karşılaştırma ile belirlenir. Bu karşılaştırma yöntemi, ASHRAE 2001 Handbook Fundamentals'da yer almaktadır [26]. Isı transfer katsayısına bağlı olarak kütle transfer katsayısını hesaplayan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$h_m = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{2/3} \frac{h_c}{\rho_{kuru hava} c_{p,hava}} \quad (2.12)$$

h_c Isı transfer katsayısı, (W/m² K)

Sc Schmidt sayısı

$Pr=0.7$ ve $Sc=0.6$ alınır.

Hem su film yüzeyinde hem de atmosferde özgül nem aşağıdaki eşitlikte verilen standart psikrometrik ilişki kullanılarak belirlenir [26].

$$W = 0.622 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) \quad (2.13)$$

p atmosferik basınç, (kPa)

p_v su buharının kısmi basıncı, (kPa)

Eşitlik 2.13'deki atmosferik basınç aşağıdaki eşitlik kullanılarak rakım'a (yükselti) göre belirlenir.

$$p = p_{std} \left(1 - \frac{A \cdot z}{T_0} \right)^{5.265} \quad (2.14)$$

p_{std} standart atmosferik basınç, (kPa)

A 0.0065 (K/m) (Hava sıcaklığının yükseklikle değişmesi)

z bulunulan yerin deniz seviyesine göre yüksekliği, rakım, (m)

T_0 288.2 K

Donma noktasının altında ve üstündeki sıcaklıklarda su buharının doyma kısmi basıncı su için hazırlanmış bulunan buhar tablolarından alınabileceği gibi, uygun denklemlerin kullanılmasıyla da hesaplanabilir.

2.2.5. Isı Akısı Hesapları

Kar eritme sistemi için gerekli ısı akıları Eşitlik 2.1 - 2.4 kullanılarak hesaplanabilir. Hesaplamalar, kar yağışı miktarı, rüzgar hızı, çevre sıcaklığı ve çığ noktası sıcaklığının (ya da diğer bir nemlilik kriterinin) aynı andaki değerleri kullanılarak yapılmalıdır. Birkaç yıllık bir süre kullanılarak kar yağışının saatlik değerleri için gerekli ısı akılar hesaplanarak ısı akının saatlik dağılım frekansı elde edilir. Bir sistemin hesaplanması ve boyutlandırılmasında yıllık ortalamalar ya da maksimumlar kullanılmamalıdır.

2.2.6. Sırt ve Kenar Kayıpları

Adlam (1950) sırt ve kenar kayıplarının, blok yapısı, çalışma sıcaklığı, toprak sıcaklığı, sırt ve yan izolasyonu ile % 4 - % 50 arasında değişebilen değerlerde olduğunu göstermiştir. 60 cm toprak derinliğinde 4.5 °C'lik bir toprak sıcaklığı ile sırt ve kenar kayıpları yaklaşık % 20'dir [25]. Daha yüksek sırt ve kenar ısı kayıplarını getiren faktörler;

- Daha düşük toprak sıcaklıkları,
- blok üzerindeki daha fazla kar,
- park yerleri ve köprülerdeki gibi açıkta kalan arka kenarlar.

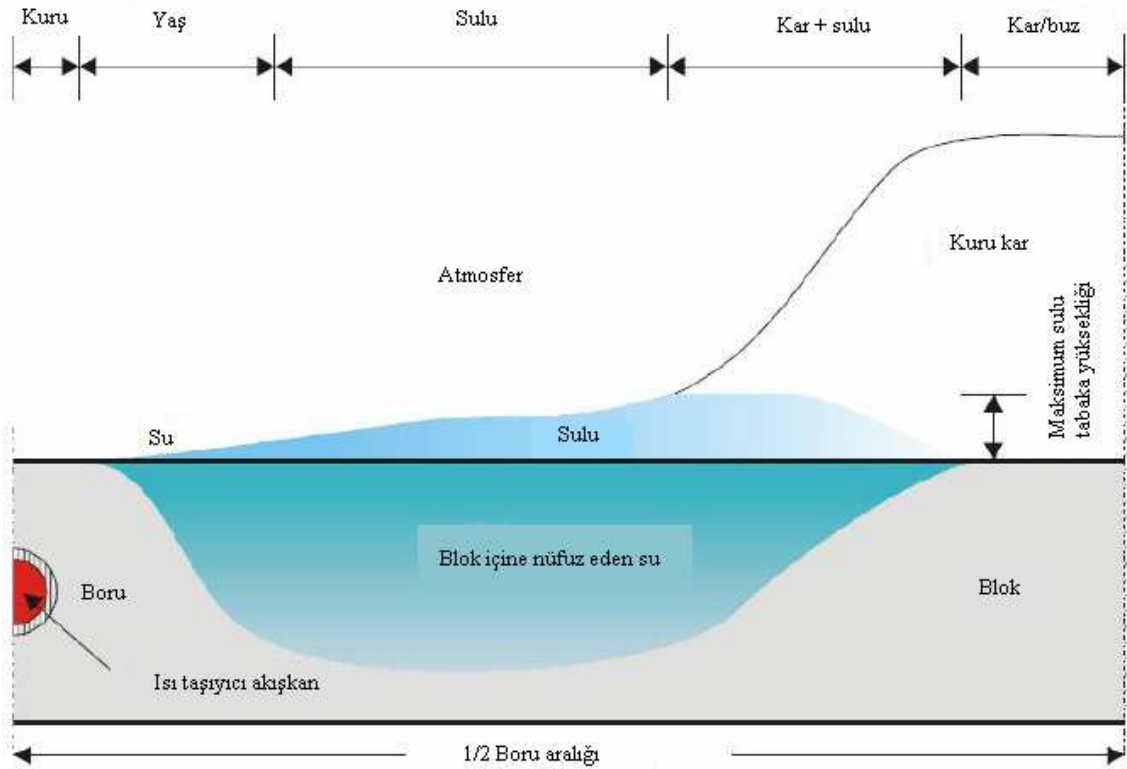
Tablo 2.1'de sırt ve kenar ısı kayıpları özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Sırt ve kenar ısı kaybı [27]

Uygulama	Yüzde %
Tüm alt ve kenarlar yalıtımlı	% 0
Altın tümü yalıtımlı fakat kenarlar yalıtımsız	% 4
Alt açık ve kenarlar yalıtımlı	% 10
Yalıtım yok	% 20
Köprü veya park rampası	% 40

2.2.7. Blok Yüzeyinde Oluşan Yüzey Şartları

Köprü yüzeyindeki karı sulu sistemler ile eritme işlemi karmaşıktır. Yüzeylerde kar eritme işlemi; erime, buharlaşma, ısıtım ve taşınım ile, blokta ise iletim ısı transfer mekanizması ile oluşur. Şekil 2.1’de karın erimesi sırasında yüzeyde oluşan şartlar şematik olarak verilmektedir [9, 28, 29].



Şekil 2.1 Kar erimede oluşan yüzey şartlarının değişimi- karın erimesi sırasında bloğun kesit görünüşü [20, 28]

Karın erimesine ek olarak bloğun hangi hava şartlarına maruz kalacağını belirlemek gerekir. Yüzeydeki kar eritme problemlerinin çözümünün en kolay olanı blok üzerinin kuru olması halidir. Çoğu durumda yüzeyin kuru olduğu, başlangıç şartı olarak kabul edilir. Ayrıca yüzey kar veya buzun erimesinden veya yağmurun yağmasından dolayı ıslak olabilir. Havanın soğuk olması ve su veya sulu karın olması durumunda yüzeyde buz oluşur.

Kuru: Yüzeyde su veya buz yoktur. Yüzey sıcaklığı donma noktasının altında veya üstündedir.

Islak: Yüzeyde biraz su vardır fakat buz yoktur. Yüzey sıcaklığı donma noktasının üzerindedir.

Kuru kar: Yüzeyde sıvı içermeyen yeni yağmış (taze) kar vardır. Burada kar buzun gözenekli bir matrisi olarak düşünülebilir. Yüzey sıcaklığı donma noktasının altındadır ve kar sürekli olarak erimiyordur.

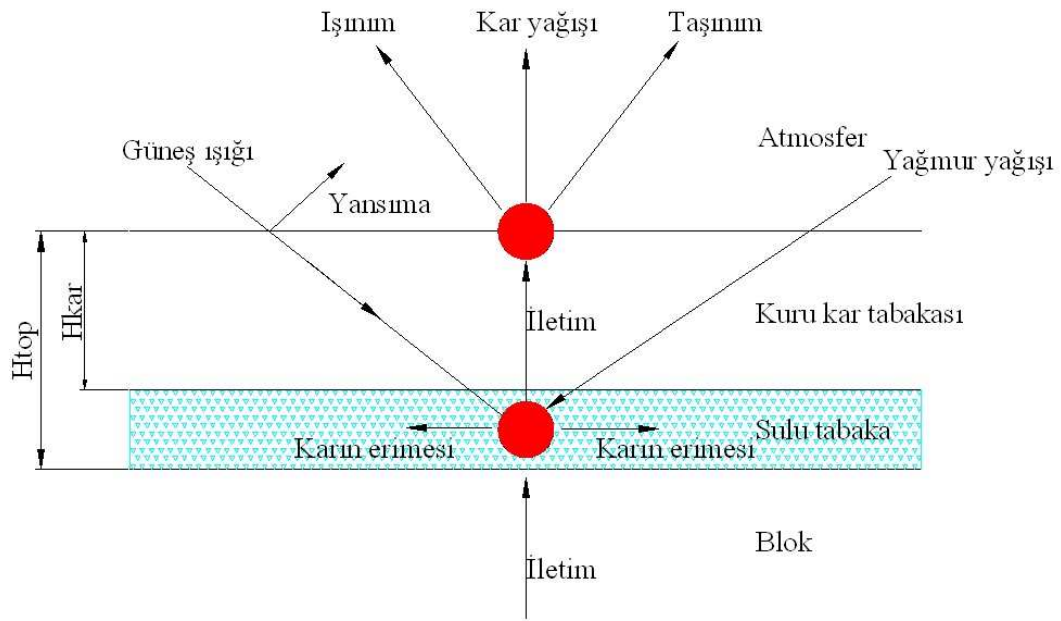
Sulu kar: Yüzeyde tamamen suyla doymuş kar kristalleri biçiminde buz vardır. Su üst yüzeye buza nüfuz eder. Yüzey sıcaklığı donma noktasının altındadır.

Kar ve sulu kar: Yüzeyde, kısım kısım erimiş kar kristalleri biçiminde buz parçaları vardır. Karın en dip kısmı suyla doymuş haldedir ve üstünde kuru kar vardır. Bu şart, karın erimesinin genel şartıdır ve yüzey sıcaklığı donma noktasındadır.

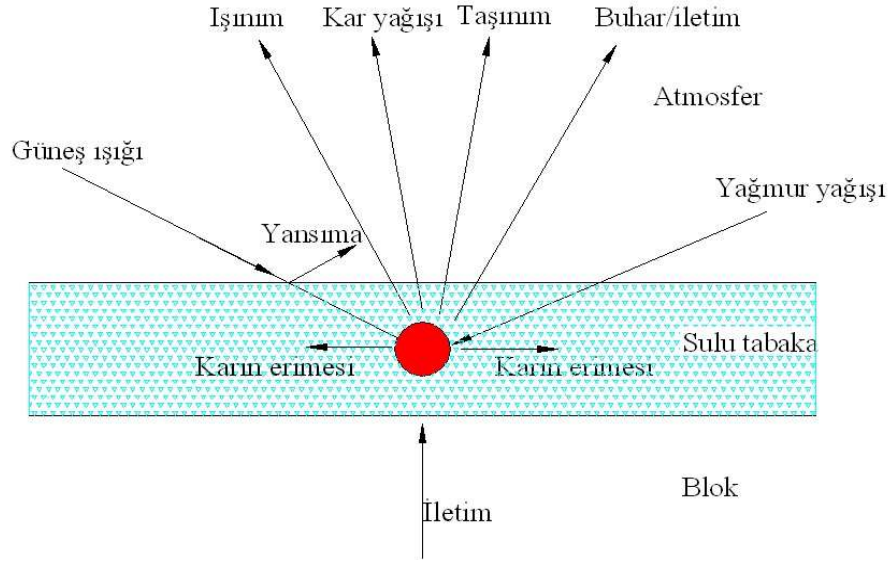
Katı buz: Yüzeydeki buz, kar gibi gözenekli değildir. Sıvının donmuş hali gibi katı şekildedir. Yüzey sıcaklığı donma noktasının altındadır.

Katı buz ve su: Yüzeyde katı buz ve su vardır. Katı buzun erimeye başlaması veya katı buz üzerine yağmur yağması durumunda meydana gelir. Erime altta veya üstte oluşabilir. Yüzey sıcaklığı donma noktasındadır.

"Karlı ve sulu" ve "yalnızca sulu" şartlar altında ısı transferi Şekil 2.2 ve 2.3'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.2 Karlı ve sulu kar eritme modelinde ısı transferinin şematik gösterilimi [20]



Şekil 2.3 Sulu tabakada ısı transferinin şematik gösterilimi [20]

Kar eritme sistemlerinde bir takım kabuller yapılır, bunlar aşağıda sıralanmıştır;

- “Kuru kar” tabakası homojen ve geçirgen bir yapıya sahiptir.
- Sulu tabaka izotermaldir, değişmez bir sıcaklık vardır.
- Karın erimesi yalnızca en alt tabakada yani blok yüzeyinde gerçekleşir.
- Kar tabakasından sulu tabakaya katı haldeki karın geçişi kütleli denge ile hesaplanır.
- Karın üst yüzeyinde taşınım ele alınıyor iken kar tabakasının gözenekli yapısından dolayı kar tabakasındaki hava akımından dolayı oluşan taşınım ihmal edilir.
- Kar tam olarak mat değildir. Kuru kar tabakası kütlesi tarafından güneş ışınları tamamen emildiğinden güneş ışınlarına maruz kalan üst kısımda yansıma olmaz.
- Kar yağışı kuru kar tabakası için ele alındığında, yağmur yağışı bu tabakayı ya direkt ya da bu tabakadan hemen süzülerek içine işler (Derinliği çok büyük olan karlarda dikkate alınmaz).
- Sıvı ve buz sulu tabakada aynı anda bulunur.
- Sulu tabakada oluşan taşınım ve buharlaşma, yüzeyin kuru kar tabakası ile kaplanması ile ihmal edilir.
- “Karlı ve sulu” şartlarda erimiş suyun sınırlı bir miktarı sulu bir tabakada şekillenen kapılar hareketle zemin yüzeyine yakın yerde tutulur. Bu tabakanın

derinliği kapilar ve yerçekimi kuvvetlerinin dengelendiđi bir yükseklikte sabittir.

- Erimiş su, sulu tabakada durmaz ve yüzeye doğru akar.
- Kar eritme işlemi bir boyutlu işlem olarak düşünülür. Bundan dolayı, birbirine bitişik olan kar ve sulu tabaka arasında gizli ısı ve kütle transferi dikkate alınmaz.
- Kar yağışından sonra oluşan kar tabakasına yağmur yağdığında sulu tabaka olarak dikkate alınır.

Karın veya buzun eritilmesi için bloğun tasarlanmasında aşağıda sıralanan etkenlerin dikkate alınması gerekir.

- 1.Yüzeydeki ısı transfer mekanizması,
- 2.Bloğun yapısı (kullanılan malzemeler, kalınlık, alan),
- 3.Boru tesisatının yapısı (malzeme, çap, aralık ve gömülme derinliği),
- 4.Sistemin debisi,
- 5.İsı transferi akışkanının özellikleri (yoğunluğu ve ısı özellikleri),
- 6.Akışkanın giriş sıcaklığı

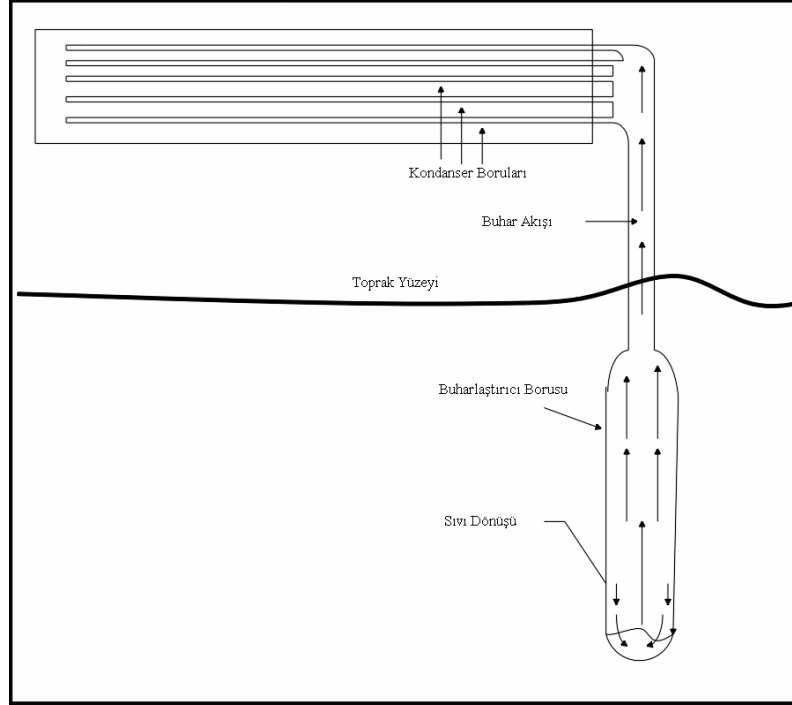
2.3. Kar Eritme Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kar eritme sistemleri: Isı borulu, sulu, elektrikli ve kızıl ötesi ısı yayan kar eritme sistemleri olarak sınıflandırılır.

2.3.1. Isı Borulu Sistem

Isı borulu sistem, literatürde sulu sistemler içinde de sınıflandırılabilir. Isı borulu sistemler; pompalara, kontrol sistemlerine, dış güce veya herhangi bir insan müdahalesine gerek duymadan çalışır. Isı borulu sistem, pasif jeotermal bir köprü ısıtma sistemi olarak da bilinir. Isı borusu kurulum aşamasında amonyak sıvısı ya da freon gazlarıyla doldurulur. Toprağın içine yerleştirilir. Akışkan toprağın ısıyla ısı borusunun dibinde (evaporatör kısmında) ısınır. Isınan akışkan, ısıtılacak alana serili olan boruların olduğu kondenser bölümüne hareket eder. Yoğuşarak ısınıp bırakır. Yoğuşmuş akışkan yerçekiminin etkisiyle çevrimini tamamlayarak evaporatöre geri döner [24]. Isı boruları çok geniş sıcaklık aralığında, değişik ebatlarda, sabit veya esnek şekillerde silindirik, düzlemsel, dönelebilir veya kullanma yerine ve amacına uygun

olarak imal edilirler [30]. Köprü döşemesinin ısıtma sisteminde kullanılan ısı borusu şematik olarak Şekil 2.4’de verilmektedir.



Şekil 2.4 Isı borusunun şematik gösterimi [31]

Buharlaştırma-yoğuşma dönüşümü, köprü döşemesinin topraktan daha soğuk olduğu zamanlarda kendiliğinden gerçekleşir. Sistem, buzu tam çözemesi bile topraktan sürekli ısı alır. Sistemin topraktan sürekli ısı çekişi işletim bakımından herhangi bir problem oluşturmaz. Çünkü maliyet sorunu yoktur. Ancak ısı borusunun içinin dikkatli bir şekilde temizlenmesi, döşemeye dizilen borulara buharın akması için eğim verilmesi gerekir. Boru büyüklüğü veya derinliği arttırıldığında, aşırı ısı kaybına önlem alınmalıdır [31].

2.3.2. Sulu Sistemler

Sulu sistemlerde, akışkan farklı metotlarla ısıtılarak bir sirkülasyon pompası yardımıyla asfaltın altına döşenmiş borulardan dolaştırılır. Isı, akışkandan yüzeye transfer edilir. İletimsel olarak yüzey ısıtılır. Akışkan olarak su+antifriz karışımı (etilen veya propilen glikol ve su) kullanılır [24, 25]. Sulu sistemler için bir gazlı boyler, elektrikli ısıtıcı, jeotermal su veya endüstri işlemleri sonucunda oluşan atık ısı alternatif ısıtıcı olarak sayılabilir [32].

Sulu ısıtma sistemi, mevcut ısıtma sistemleri arasında işletme maliyeti olarak en uygun olanıdır. Çünkü bu sistemin diğer sistemlere göre avantajları vardır. Sulu sistemler ile pasif ısı

borulu sistem karşılaştırıldığında; sulu sistemlerde ısıtılan akışkan, ısıtılması düşünülen alana bir sirkülasyon pompası ile taşındığından ısı borularında olduğu gibi ne borulara bir eğim verilmesi gerekir ne de boruların temizlenmesi önemlidir. Isı döşemeye düzgün bir şekilde taşınır. Bu sistemler diğer sistemlere göre daha yüksek enerji verimine sahiptirler.

Sulu sistemler içerisinde son yıllarda en verimli yöntem olarak TKIP sistemleri kullanılmıştır. TKIP sistemi yardımı ile topraktan çekilen ısıнын sulu sistemlerde kullanılması mümkündür.

2.3.2.1.TKIP Sistemi ile Kar ve Buzu Eritme

TKIP yardımıyla yeraltı suyundan veya topraktan çekilen ısıнын sulu sistemler için kullanılması mümkündür. Bu sistemler aktif jeotermal sulu sistemler olarak da adlandırılabilir. TKIP'lar, temel anlamda toprak ile ısıtılacak yer arasında bir ısı alışverişi sağlar. Bunun için genellikle uzun veya çok sayıda plastik boru, yatay veya düşey olarak toprak altına döşenir. Akışkan olarak boruların içerisinde su+etilen glikol veya su+propilen glikol çözeltisi dolaştırılır. Sıcaklık farkından dolayı olan ısı transferi, borular içerisinde dolaştırılan akışkan ile soğutucu akışkan arasında bir ısı değişiricisi vasıtası ile olur [33].

TKIP teknolojisi yeryüzünün belirli bir derinliğinde sıcaklığın yıl içinde nispeten sabit kalması gerçeğine dayanır. Toprak tabakası, kışın yeryüzünün altında veya yer altı sularında depolanmış ısıyı bir alana, yazın alandaki ısıyı yeraltına taşıyarak doğanın bize verdiği bu avantajı kullanırlar. Kısaca yer altı; kışın bir ısı kaynağı, yazın ise bir ısı kuyusu olarak davranır [3].

TKIP sistemleri günümüzde ortamları ısıtma - soğutma ve sıcak su elde edilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu ihtiyaçların tümüne tek makineyle cevap verebildikleri için de tercih sebebi olmuşlardır. TKIP'lar geçtiğimiz yarım yüzyıl içerisinde kış sezonunun uzun ve sert geçtiği Kuzey Avrupa, İskandinavya, Kanada ve Kuzey Amerika'da avantajları ve yüksek konfor özelliklerinden ve çok yönlü kullanılabilir olmasından dolayı tercih edilmişlerdir.

TKIP sistemi, toprağın veya yeraltı suyunun yaz ve kış aylarında hemen hemen sabit denebilecek sıcaklıktaki (7 – 22 °C arasında değişebilen) enerjisinden faydalanmak suretiyle kışın ısıtma, yazın ise soğutma amacıyla yaygın olarak kullanılır.

Toprak, oldukça yüksek bir ısı potansiyeline sahiptir. Toprak, ihtiyaç duyulduğu kadar bir ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Yerden birkaç metre aşağıdaki sıcaklıklar yıl boyunca kararlılık gösterir. Oysa yer yüzünde sıcaklık farklı mevsimler ile değişiklik gösterir. Isı pompasında farklı potansiyeller ısı kaynağı (ve çukuru) olarak kullanılabilirler. Bunların

başlıcaları; hava, su (yüzey ve yer altı suları), toprak ve güneştir. Bunların ilk üçü primer kaynak olup tek başlarına sıcak ve soğuk kaynak olarak kullanılabilirler [34].

Toprağın derinliklerindeki ısı enerjisini ısı pompası, ısı transfer akışkanı ve polietilen borular yardımı ile yüzeye çıkartmak mümkündür. Yüzeye çıkartılan ısı enerjisi ile yol/köprü yüzeyinde oluşan buz ve biriken kar eritilebilir. Borularda dolaştırılan akışkanın sıcaklığının yüksek seviyesi, buzlanmayı önleyici sistemin geçerliliğini arttırmaktadır. Amerika’da yapılan bir çalışmada toprak ısı değiştiricisinde dolaştırılan akışkanın ortalama sıcaklığı 13.2 °C iken TKIP yardımı ile akışkan sıcaklığı 40-55 °C’ye kadar çıkartılmış ve köprü yüzeyindeki kar veya buz eritmeye çalışılmıştır [9].

Kar eritme sistemi için TKIP’in tasarımında amacın yalnızca yüzeyin ısıtılması olması nedeniyle sistem dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Giriş ve çıkış verileri takip edilmelidir. Çünkü sistem sürekli olarak kış mevsimi süresince topraktan ısı çektiğinden, her yıl toprakta mevcut olan potansiyel ısıtma enerjisi giderek azalacaktır. Sonuç olarak, toprak ısı değiştiricinin (TID), gelecekteki 20-30 yıllık ısıtma yükünü karşılayacak kadar son derece büyük olması gerekir. Topraktaki ısı yüklerinin dengesizliğini gidermek için, köprü döşemesinin geniş yüzey alanının bir güneş kolektörü olarak kullanımı ve toprağın ısı depolama özelliğinin avantajları da kullanılabilir. Bir sonraki kış mevsiminde topraktaki ısının tekrar kullanılması için akışkan yaz ayları süresince köprü döşemesi ile toprak arasında dolaştırılır. Böylece gerekli TID’in ebatları küçülecektir.

Topraktaki ısının ısı pompasına, ısı pompasından toprağa veya döşemeye taşınması TID’de dolaştırılan bir akışkan ile olur. Salamuralar, yağlar ve glikollü su gibi değişik akışkanlar ısıyı ısı pompası yardımıyla eritme bloğuna aktarmak için uygun çözeltilerdir [28]. Isıl kapasite, viskozite, ısıl iletkenlik gibi termodinamik özellikler akışkanın karakteristiğini belirler. Akışkanın viskozitesi düşük ise sirkülasyon pompasının gücü düşer. Enerji depolama açısından akışkanın ısıl kapasitesi iyi olmalı ve iyi bir ısı transferi sağlamak için akışkanın ısıl iletkenliğinin iyi olması gerekir.

Sulu sistemlerde kullanılan borunun malzemesi yüksek yoğunluklu polietilen (PEX) plastiktir. Bu borular hafif, bağlantısı kolay ve metal borular gibi korozyona uğramadıklarından tercih edilir [9, 10, 23, 28]. Isıtılması düşünülen yüzey altına dizilişinin bozulmaması için boruların çimento veya asfalt dökülmeden önce bağlantıları yapılır.

Kar eritme sistemlerinde borular arasındaki mesafenin önemi büyüktür. Borular arasındaki mesafenin azaltılması ile akışkanın daha düşük sıcaklıklarında yüzeydeki kar veya buz eritilebilir. Borular arasındaki uygun mesafe Tablo 2.2’de verilmektedir [27].

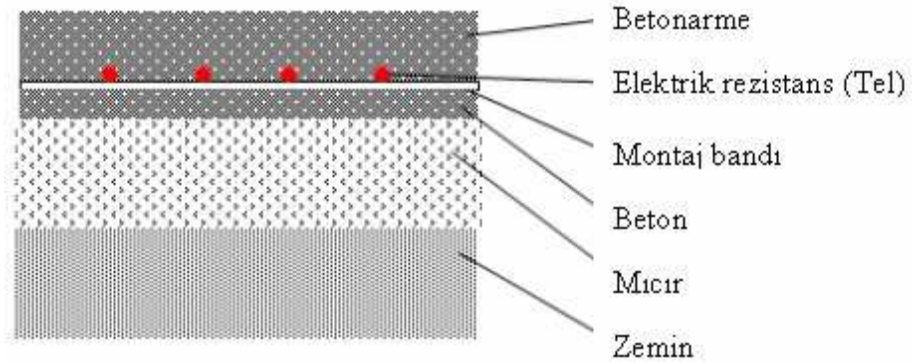
Tablo 2.2 Kar eritme yüklerine göre önerilen boru merkezleri arasındaki mesafeler [27]

	Kar eritme yükü(Btu/h ft ²)				
	100	150	200	250	300
Boru çapı (inç)	Önerilen borular arasındaki mesafe, inç(mm)				
½	9(228.6)	9(228.6)	6(152.4)	6(152.4)	6(152.4)
5/8	9(228.6)	9(228.6)	9(228.6)	6(152.4)	6(152.4)
¾	12(304.8)	12(304.8)	9(228.6)	9(228.6)	6(152.4)

Kurulan sistemde kar ve buzu eritmek için gerekli toplam ısı yükü Denklem 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Kuru termometre sıcaklığı -8 °C, rüzgar hızı 6,84 km/saat ve blok karakteristik uzunluğu 1.2 m, Pr =0.6 ve Sc=0.6 alınmıştır. Yapılan hesaplamada Ar=1.0 için 440 W/m², Ar=0.5 için 344 W/m² ve Ar=0 için 250 W/m² hesaplanmıştır.

2.3.3. Elektrikli Kar Eritme Sistemleri

Enerji kaynağı olarak elektriğin kullanıldığı elektrikli kar eritme sistemleri, mineral izole edilmiş kablolar ve dirençli elektrik tellerinin kullanılmasıyla oluşturulan buz eritme sistemleridir [24,25]. Elektrikli ısıtma elemanlarının yerleşimi Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Beton plakalara yerleştirilen teller veya kablolar, betonun çatlaması veya gerilimden dolayı ısınarak birbirlerinden ayrılabilir. Isınan kablo veya tel kırılabilir. Bunu önlemek için tasarım sırasında genişleme-daralma mafsalı, sağlamlaştırma ve boşaltma (drenaj) dikkate alınmalıdır. Elektrik fiyatının yüksek olduğu ülkelerde bu tür sistemleri işletmek pahalıdır. Beton, yapısı gereği büyük ısı kapasitesine sahip olduğundan uzun süreli veya yüksek bir gücü gerektirir [35]. Bu tür buz ve kar eritici sistemlerin etkili olarak çalışabilmesi için termostat ve sensör, sistemin bir parçası olarak kullanılmalıdır. Termostat ve sensörlerin ısı ve nemi kontrol ederek kar yağışı ile birlikte sistemi çalıştırması, güç tüketimini mümkün olan en aşağı seviyede tutmaktadır [36].



Şekil 2.5 Elektrikli ısıtma elemanlarının yerleşimi

Elektrikli sistemlerin ısı yükü hesapları sıcak sulu sistemlerin tasarımı ile aynıdır. Birim alandaki ısı miktarı ısıtma elemanları arasındaki aralıklardan dolayı değişir. Elektrikli ısıtma kullanılacağı zaman bloğun uygun şekilde tasarlanması gerekir.

1. Kurulum sırasında ve sonrasında üniteler bir ohmmetre ile kontrol edilmelidir.
2. Geçici olarak üniteler bir zemin üzerine yerleştirilerek iletken besleyicileri ve bağlantı kutuları yerleştirilir. İlk dökümden sonra üniteleri geçici olarak yerinden almak için kabloları yeteri kadar gevşek bırakmak gerekir. Bütün uçlar verilen topraklama elemanları ile uygun biçimde topraklanır.
3. Bütün uçlar plastik izolatörlerle, su girişini önlemek amacıyla sarılmalıdır.
4. Yeni dökülmüş beton bir blok üzerinde yürünmemelidir.
5. Kurulum yapılan alan(asfalt, beton) tamamen donana kadar, test amacı dışında enerji verilmemelidir [25]. Elektrikli kar eritme sisteminde ısıtma kablolarının karakteristiklerini belirlemek için ısıtılan alan büyüklüğü, gerekli güç yoğunluğu, kullanılabilir voltaj ve yaklaşık olarak kablo uzunluğunun bilinmesi gerekir. [25, 36].

2.3.4. Kızıl Ötesi Isı Yayan Kar Eritme Sistemleri

Basit bir yapısı olduğundan aydınlatma lambası gibi kurulumu kolaydır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve toprak enerjisi gibi çevreye bir zararı yoktur [37]. Kızıl ötesi ısıtma, ısıнын ışıkla taşınma şekli olarak tanımlanır. Kızıl ötesi ışıklarının diğer ışıklardan (sarı, mavi, yeşil ışık vb.) farkı ise ısıyı diğerlerinden daha fazla taşıyabilmesidir. Uzay boşluğunu geçerek dünyamıza kadar gelen ve dünyayı ısıtan güneş ışıkları da kızıl ötesi ışıklarıdır. Konfor ısıtması sağlayan kızılötesi sistemler özellikle fabrika, iş hanı, hastane girişlerinde ya da yükleme bölgelerinde son derece yararlıdırlar. Ancak kızıl ötesi ısıtıcıdan yayılan ışıının, hedeflenen alanın dışına yayıldığından sistem ekonomik değildir.

İdeal enerji dağılımı, tasarım gereksinimlerini karşılayan yoğunlukta bir enerjinin hedef alan üzerinde sürekli dağılımı demektir. Isıtma reflektörlerinin tasarımı, hedef alanın dışına dağılan ışıının yüzdesini belirler. Işın demetini en iyi kontrol eden apareyler bile, kenarlarda dağılmayı tam olarak önleyemez. Böylece hedef alanın bütün genişliği boyunca sürekli bir dağılım korunurken, önemli miktardaki bir ışıının da hedef alanın dışına düşer. Bu nedenle, kızıl ötesi kar eritme sistemleri, blok üzerindeki güç yoğunluğu, alanın kenarlarında başlayarak azalacak biçimde tasarlanır [38]. Bu işlem, amaca yönelik olmayan enerji kayıplarını azaltır. Sokak lambaları çevreyi aydınlatır iken rüzgar hızından etkilenmediği gibi kızılötesi ısıtıcılar da ısınıyı yüzey üzerine verirken hava sıcaklığından ve rüzgar hızından etkilenmez [37].

Kar eritme temel tasarım düşüncesi olduğunda dar ışık demetli apareyler ısıtım enerjisini hedef alan üzerinde etkili bir çalışma sağlamak üzere daha iyi yoğunlaştırır. Isıl ısıtım öncelikle orta çizgiye göre bir tarafta yoğunlaştıran asimetrik reflektör tipi apareyler, genellikle hedef alanın kenar çevresi boyunca yerleştirilir. Kızıl ötesi apareyler genellikle apareyin uzun kenarına paralel doğrultuda, dar açılı doğrultulara oranla daha uzun bir enerji yayılımına sahiptirler. Eğer hedef alanın genişliği 2.4 metreden daha fazla ise apareyleri iki ya da daha fazla paralel sıra halinde yerleştirmek uygun olur. Böyle bir uyarılma ile ısıtım hedef alana her iki yönden daha iyi bir geliş ile yönlendirildiğinden daha iyi bir konfor ısıtması sağlanır.

Eğer kızılötesi sistemin devreye girmesinden önce bir miktar kar birikimine izin veriliyorsa, sulu ve elektrikli sistemlerde olduğu gibi bloğun temiz hale getirilmesinde bir gecikme ortaya çıkacaktır. ısıtım enerjisi blok yüzeyi tarafından değil de kar tabakasının yüzeyi tarafından alındığından bu gecikme kar tabakasının kalınlığı ile hava koşullarına bağlı olacaktır. Kar yağarken 25 mm kalınlığındaki kar tabakasını eriterek bir blok yüzeyini temiz halde tutan bir sistem, aynı koşullar altında genellikle 25 mm birikmiş kar tabakasını eritmek için 1 saatlik bir süre gerektirir.

Maksimum verimin elde edilmesi için apareylerin yılda bir kez ve tercihen ısıtma mevsiminin başlangıcında temizlenmesi gerekmektedir. Diğer bakım değerleri en düşük düzeydedir.

Ekonomik Avantajları [39]:

- Enerjiyi, diğer sistemlere göre % 80 daha verimli iletir.
- Malzemeye temas etmeden ısıtır.
- Hızlı ve kaliteli ısıtır.
- Rüzgar ve hava akıntısından etkilenmez.
- Mekan değişikliğinde kolay taşınabilir.

2.4. Kar Eritme Sistemlerinde İşletme Maliyeti Hesabı

Sistemi çalıştırmak için birim alan başına gerekli ortalama enerji gereksinimleri ile birlikte eritme ve bekleme zamanları bilinmelidir. Bu değerler birkaç 10 yıllık zaman diliminde ancak ortalama olarak elde edilir. Enerji değerlerinin yanı sıra sırt ve kenar kayıplarının da bilinmesi gerekir. Bu değerler karsız alan oranları (1.0, 0.5 ve 0) içindir. Tasarım kar eritme enerjisi şüphesiz hava şartlarına göre değişim gösterdiğinden karsız alan oranları (1.0, 0.5 ve 0) için gerekli enerji düzeyleri de değişir [22].

Bekleme zamanı olarak, 0 °C'nin altındaki hava sıcaklığında kar yağışı bulunmayan bütün saatleri kapsamaktadır. Bekletme ve eritme verileri blok yüzeyini 0 °C sıcaklıkta tutmak için gerekli enerji miktarına dayanmakta ve sistemde bir blok sıcaklık sensörü bulunmalıdır.

Sulu ve elektrikli bir sistem için işletme maliyeti aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$M = \frac{A_t Q_a F}{[1 - (B/100)(\eta_b \eta_d)]} \quad (2.21)$$

M	Yıllık çalışma maliyeti, YTL/yıl
A_t	Toplam kar eritme alanı, m ²
Q_a	Yıllık kar eritme veya bekleme enerji gereksinimi, kWh/m ²
F	Birincil enerji maliyeti, YTL/kWh
B	Sırt kaybı yüzdesi,
η_b	Yanma verimi (Isı pompasının ısıtma konumundaki COP'u), boyutsuz. Eğer kar eritme ya da bekleme süresinde atık bir enerji kullanılıyor ise bu terim ihmal edilebilir.
η_d	Enerji dağıtım verimi, boyutsuz (elektrik sisteminde 1 olarak alınabilir)

Farklı ısıtma sistemlerinin karşılaştırılması Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 Farklı ısıtma sistemlerinin karşılaştırılması [2]

Isıtma şekli	Kurulum maliyeti	Yıllık işletme maliyeti	Güç tüketimi
Kızılötesi ısı lambası ile ısıtma	96 \$/m ²	Mevcut değil	75 W/m ²
Elektrikli ısıtma	54 \$/m ²	4.8 \$/m ²	323-430 W/m ²
Sıcak sulu	161 \$/m ²	2.50 \$/m ²	473 W/m ²
Gazlı ısıtma	378 \$/m ²	2.1 \$/m ²	Mevcut değil

Sistemin kurulum maliyetinde sondaj kuyularının kazımı 20 YTL/m, U borusu 1.86 Euro/m, TKIP sistemi 3000 YTL, ısı duyarlılık testi 2000 YTL, bentonit 10 YTL/kg, antifriz 6 YTL/kg, işçilik vs. olmak üzere yaklaşık kurulum maliyeti 12000 YTL olarak hesaplanır. Sistemin işletim maliyetinin hesaplanması için Denklem 2.21 kullanılmıştır. Bu hesaplamada toplam kar eritme alanı 4.08 m², elektrik fiyatı 0.150 YTL/kWh, yıllık kar eritme ya da bekleme enerji gereksinimi 35.1 kWh/m², sırt kaybı %30, ısı pompasının ısıtma konumundaki COP'u 3 ve enerji dağıtım verimi 0.98 alınarak sistemin yıllık işletim maliyeti 10.5 YTL olarak bulunmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Sondaj Kısımının Hazırlanması

Düşey tip tekli U-borulu TKIP sisteminde, TID için kullanılacak düşey borular 20-40 mm nominal çaplar arasında değişir. Delik derinliği ise yerel delme koşulları ve mevcut ekipman olanaklarına göre 15-180 m arasındadır. Sistem suyu ya da su+antifriz karışımını bir sıvı soğutkan ısı esanjöründen ve yere gömülü bulunan termoplastik borulardan sirküle eder. Yatay ya da düşey olarak sınıflandırılır. Yatay (serme) toprak ısı değiştiricileri hendeklerin içine veya daha geniş toprak alanlarına serilerek ısı geçişini sağlarlar. Düşey toprak kaynaklı ısı değiştiriciler küçük çaplı, yüksek yoğunluklu polietilen boruların yere delinmiş bir kanal içerisine yerleştirildikten sonra çevresinin katı bir madde ile doldurulması biçiminde yapılır [22]. Düşey tip toprak ısı değiştiricisinin avantajları şöyle özetlenebilir;

- 1) Nispeten küçük bir arazi parçası gerektirmesi,
 - 2) Isıl özellikler ve sıcaklık bakımından çok az değişiklik gösteren toprakla temasta olması,
 - 3) En küçük miktarda boru ve pompalama enerjisi gerektirmesi,
 - 4) En etkili toprak ısı değiştiricisi sistem performansını verebilmesidir.
- Sakıncaları ise;
- 1) Yere deliklerin delinmesi için pahalı ekipman gerektirdiğinden kurulum maliyeti yüksekliği,
 - 2) Bu tür bir işi üstlenecek yüklenicilerin bulunmasında güçlükler yaşanabilmesidir [22].

Kuyu açılacak alanın ısı özelliklerinin tespiti için bir ön çalışma yapılır. Bu alan incelenerek kuyu kazılması için verimli olup olmadığına karar verilir. Toprağın ısı özelliklerinin yapılacak çalışmaya uygunluğuna karar verildikten sonra kuyu açma çalışmasına başlanılır. Bu çalışmada kuyular açıldıktan sonra kuyuların ısı özelliklerini tespit etmek için, ısıl duyarlılık testi (IDT) yapılmıştır.



Şekil 3.1 Kuyu açılacak alanın görünüşü

Kuyuların açılacağı yerin uygunluğu tespit edildikten sonra 30 metre derinliğindeki kuyunun kazılmasına başlanılmıştır. Toprağın kuyu çevresine sıvanması için bentonit malzemesi kullanılmıştır. Bentonitin sondaj aracının devir daim suyuna aktarılışı Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Kuyu açılması sırasında bentonitin aktarılışı

30 metre derinliğindeki kuyunun açıldıktan sonraki görünümü Şekil 3.3’de görülmektedir. Toprakta mevcut ısıнын yüzeye çıkarılması için kullanılan U-tipi polietilen SDR 11 (40x2.4 mm) borunun kuyuya rahat bir şekilde indirilmesi için ucuna 50 kg ağırlığında demir bağlanmıştır. Ucuna ağırlık bağlantısı yapılmış sistem Şekil 3.4’de görülmektedir. U-borusu kuyuya salınırken boru merkezleri arasındaki mesafenin 6 cm olmasına dikkat edilmiştir. Kuyuya salınan boruların her 30 metresine ısı çift bağlantısı yapılmıştır. Böylece toprağın her 30 metredeki sıcaklık değerleri data logger tarafından kaydedilmiştir. U-borusu kuyuya döşendikten sonra çevresi bentonit malzemesi ile doldurulmuştur. Borunun kuyuya yerleştirilmiş ve çevresinin bentonit malzemesi ile doldurulmuş hali Şekil 3.5’de verilmektedir.



Şekil 3.3 Sondaj kuyusunun açılmış halinin görünümü



Şekil 3.4 U-borusunun kuyuya yerleştirilmesi

Deliğin boşluklarını doldurmakta kullanılan dolgu malzemesi yasal, ısıl ve ekonomik düşüncelerin bir fonksiyonudur. Kuyu endüstrisinde öteden beri düşük maliyetli bir dolgu malzemesi olan bentonit yerine bazı durumlarda ise delme sırasında çıkan malzeme kullanılmaktadır. Tablo 3.1’de seçilmiş bazı toprak, kaya ve harç/dolgu malzemesinin ısıl özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Bazı toprak, kaya ve harç/dolgu malzemelerinin ısıl özellikleri [22]

	Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/m K)
Topraklar		
Ağır Çamur (% 15 su)	1925	1.4~1.9
Ağır Çamur (%5 su)	1925	1.0~1.4
Hafif çamur (% 15 su)	1285	0.7~1.0
Hafif çamur (% 5 su)	1285	0.5~0.9
Ağır kum (%15 su)	1925	2.8~3.8
Ağır kum (%5 su)	1925	2.1~2.3
Hafif kum (% 15 su)	1285	1.0~2.1
Hafif kum (% 5 su)	1285	0.9~1.9
Kayalar		
Granit	2650	2.3~3.7
Kireç taşı	2400~2800	2.4~3.8
Kum taşı	2570~2730	2.1~3.5
Harçlar/Alt dolgu malzemeleri		
Bentonit (%20-30 katılar)		0.73~0.75
Susuz saf çimento (önerilmez)		0.69~0.78
% 20 Bentonit % 90 SiO ₂ Kum		1.47~1.64
% 15 Bentonit % 85 SiO ₂ Kum		1.0~1.10
% 10 Bentonit % 90 SiO ₂ Kum		2.08~2.42
% 30 Beton % 70 SiO ₂ Kum		2.08~2.42

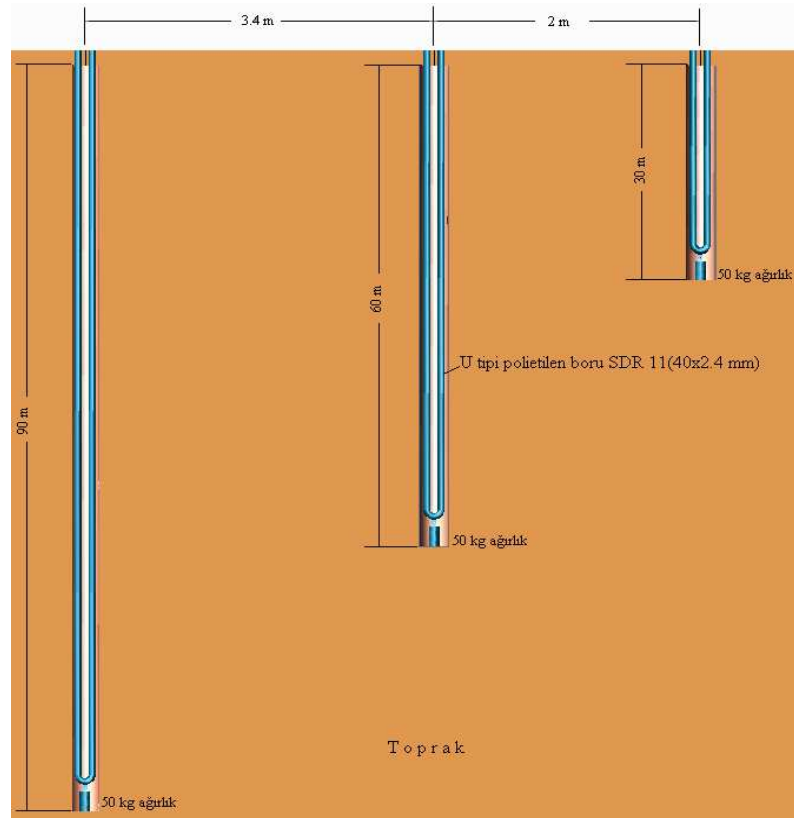


Şekil 3.5 U-borusunun bentonit dolgusu ile dolgu yapılmış halinin görünümü

30 m’lik sondaj kuyusu için yapılan işlemler benzer şekilde 60 ve 90 m’lik kuyular için de yapılmıştır. Sondaj çalışmaları bittikten sonra köprü çalışmasına başlanılmış ve daha önce hazırlanan köprü kalıbı sondaj bölgesine yerleştirilmiştir. Kuyuların köprü modeli ile birlikte görünümü Şekil 3.6’da verilmektedir. Toprak yüzeyinde kalan boruların yalıtımı yapılmış ve 40 cm derinliğindeki toprağa gömülerek toprak kaynaklı ısı pompasına bağlantısı yapılmıştır. Kuyu merkezleri arasındaki mesafeler ve derinlikler Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 30, 60 ve 90 m derinliğindeki kuyular ile köprü modelinin birlikte görünümü



Şekil 3.7 Kuyuların derinlikleri, aralarındaki mesafeleri ve U-borusunun topraktaki üç boyutlu görünümü

3.2. Isıl Duyarlılık Testi (IDT)

Toprak ısı değiştiricili sistemlerin doğru tasarımı için en önemli bilgi, toprağın ısı özellikleridir. IDT testi, şimdiye kadar sadece toprak ısı değiştiricisi tasarımı için değil dolgu malzemesinin değerlendirilmesi, ısı değiştirgeci tipi ve yer altı suyu etkileri için de kullanılmıştır. Bunun yanı sıra test sonuçlarından elde edilen ısı özelliklere (Isıl iletkenlik, λ ve Isıl direnç, R_b) bağlı kalınarak yapılan tasarımlar sistemin ekonomik uygunluğunu da sağlamaktadır. Günümüzde yeraltındaki jeolojik formasyonların ısı özelliklerinin yerinde belirlenmesi (Şekil 3.8) konusunda IDT cihazından daha uygun bilinen bir metot henüz yoktur. IDT'in teorik temeli birkaç 10 yıl geriye dayanır 1990'lı yıllarda ilk uygulama, Linköping'deki sondaj deliği ısı deposunda yapılmıştır [40]. Bu gelişmenin ardından İsveç'in Lulea Teknik Üniversitesinde ve ABD'de kurulu bulunan Oklahoma Üniversitesinde 1995-1996 yıllarında birbirleri ile eş zamanlı tasarlanıp yapılmıştır. Bu cihazlar ile şu an 2005 yılına kadar test yapmış olan ülkeler ise [41];

- Kanada

- Şili (deneysel)
- Çin,
- Almanya (4),
- Hollanda,
- Norveç,
- Güney Kore,
- İsveç (çeşitli),
- İsviçre,
- İngiltere,
- Amerika (çeşitli)
- Türkiye'dir.

Austin [42], topraktan yararlanıp ısıtma ve soğutma yapmak için sondaj deliği içindeki kararlı toprak sıcaklığının saptanmasını ve bu sıcaklığın IDT analizinin doğruluğu üzerindeki etkilerini incelemiştir.

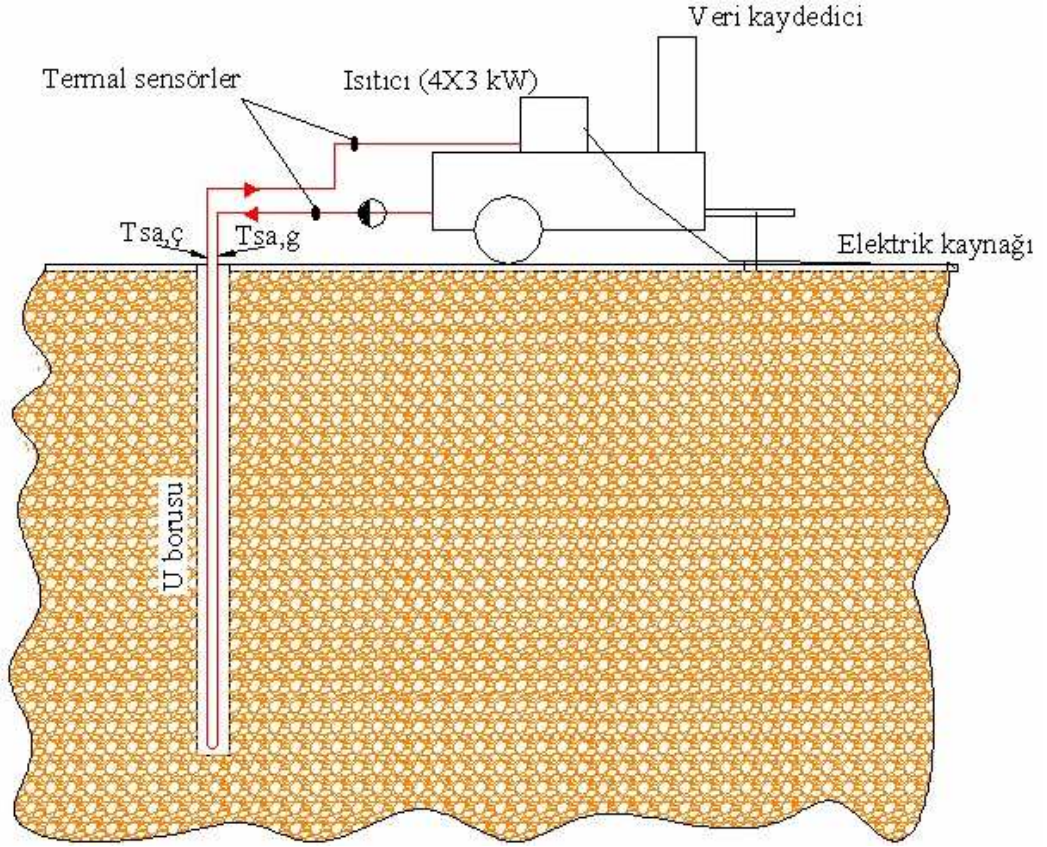
Nagano vd. [43] yer altı suyu akışının toprak ısı değiştiricisinin performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu alanda yapılan diğer çalışmalar göstermiştir ki; yer altı suyu ısı geçişinin önemli oranda artmasını sağlamıştır [44, 45]. Bazı teorik çalışmalar bu konu üzerinde yayınlanmıştır [46, 47].

Sanner vd. [41] IDT deneyinin temel kavram ve teorilerinin kısa tanımlanmasını yaparak tarihsel gelişimini ve bu teknolojinin dünya üzerinde deneylerini vurgulamışlardır.

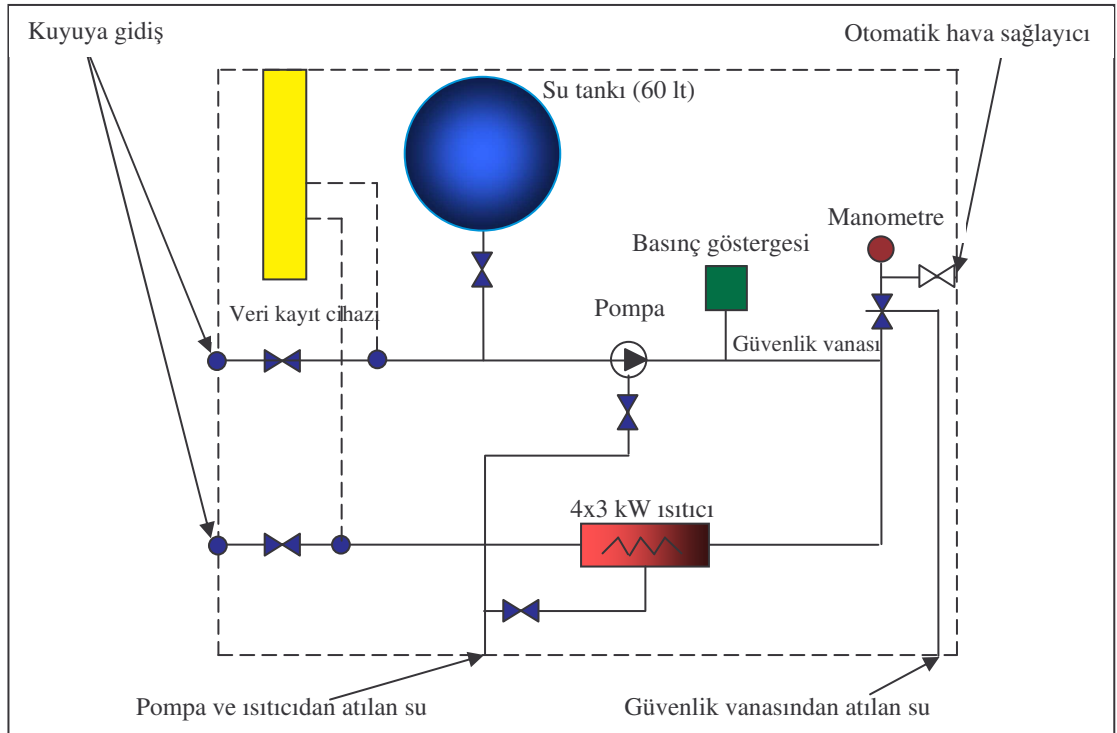
3.2.1 IDT'nin Çalışma Prensibi

IDT'nin amacı, yukarıda da belirtildiği gibi yer altında bulunan jeolojik formasyonların yerinde ısı dirençlerini (R_b) ve ısı iletkenliklerini (λ) saptamaktır. Cihaz taşınabilir olması nedeni ile araç girebilen istenilen her yerde ölçüm alma şansını bize verir. Üç faz elektrik hattı ile çalışan IDT cihazı sirkülasyon sıvısı olarak şebeke suyu kullanılmaktadır. Bir motorlu araç arkasına bağlanmaktadır. Ağırlığı yaklaşık 470 kg'dır.

Cihazın içerisinde bulunan aparatlar ise şunlardır; Su deposu, debi ölçer, sirkülasyon pompası, veri kayıt cihazı, ısıtıcı (4 X 3 kW), elektrik kontrol panosu, otomasyon için gerekli vana, boru ve göstergeler (Şekil 3.9).



Şekil 3.8 IDT cihazı ile ölçümün şematik görünümü



Şekil 3.9 IDT akış şeması [48]

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 kadar oluşturulan kapalı döngü, sirkülasyon pompası aracılığı ile başlatılır. Sirkülasyon basıncının 2-3 bar civarında olmasına dikkat edilmelidir. Basınç devamlı olarak cihaz üzerinde bulunan barometre aracılığı ile takip edilmelidir. Deney başladıktan sonra ilk 10 dakika içerisinde sistem içindeki hava alınmalıdır.

Daha sonra kuyunun derinliğine göre belirli güçte ısıtıcı çalıştırılır. IDT cihazı üzerinde 4 x 3 kW gücünde ısıtıcılar bulunmaktadır. Önerilen, 100 m derinlikte olan kuyularda 3 kW, 150 m derinliğindeki kuyular için 6 kW, 200 m derinlikteki kuyular için 9 kW ve 200 m'den daha derin olan kuyular için 12 kW'lık güç uygulamasıdır [49]. 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. Sistem her bir test için 48 saat çalıştırılmıştır. Deney sonunda bir diz üstü bilgisayar aracılığı ile veri kayıt sistemine bağlanılır ve kaydedilen veriler bilgisayara alınır. Bundan sonraki aşama bilgisayarda söz konusu verilerin değerlendirme aşamasıdır. 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.

Aralık 2000'den itibaren, Türkiye'de dört defa ısı duyarlık testi yapılmıştır. Bunlardan ilki İstanbul Hadımköy'de bulunan SAN-1 konaklarında, ikincisi ise yine İstanbul Beykoz'da bulunan Acar Kent'de uygulanmakta olan TKIP sistemleri uygulamaları için açılan kuyulardan alınmıştır. Üçüncü ve son ölçüm, Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarının kanallarda ısı enerji depolama ile soğutulması projesi kapsamında açılan araştırma kuyusundan alınmıştır.

3.2.2. IDT Ölçümü Verilerinin Değerlendirilmesi

IDT cihazının verilerinin değerlendirilmesi ile ilgili teorik kısım İsveçli araştırmacılar Göran Helleström ve Singhild Gehlin tarafından 1998 yılında ortaya konmuştur. IDT'nin temeli, sisteme verilen ısıнын, sabit bir güç kaynağından verilmesi prensibine dayanır. IDT cihazı ile alınan ölçümler, yani kanala giriş-çıkış sıcaklık değerlerinin ortalaması (T_{g-c}), $\ln(t)$ 'ye karşı çizilir ve buradan elde edilen doğrunun eğimi (k , 3.1 numaralı eşitlik), 3.2 numaralı eşitlikte yerine konularak efektif λ değeri hesaplanır. Daha sonra bulunan bu değer 3.3 numaralı eşitlikte yerine konularak R_b hesaplanır.

Bu işlemi takiben, farklı λ değerleri, deneme yanılma yöntemi ile 3.4 numaralı eşitlikte yerine konular 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 [50]. Çizgisel kaynak modeli yardımıyla aşağıdaki denklemleri elde edebiliriz.

$$T_{g-c} = k \ln(t) + m \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi kH} \quad (3.2)$$

$$m = \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_{sur} \quad (3.3)$$

$$T_{g-c} = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[\frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_{sur} \right] \quad (3.4)$$

burada,

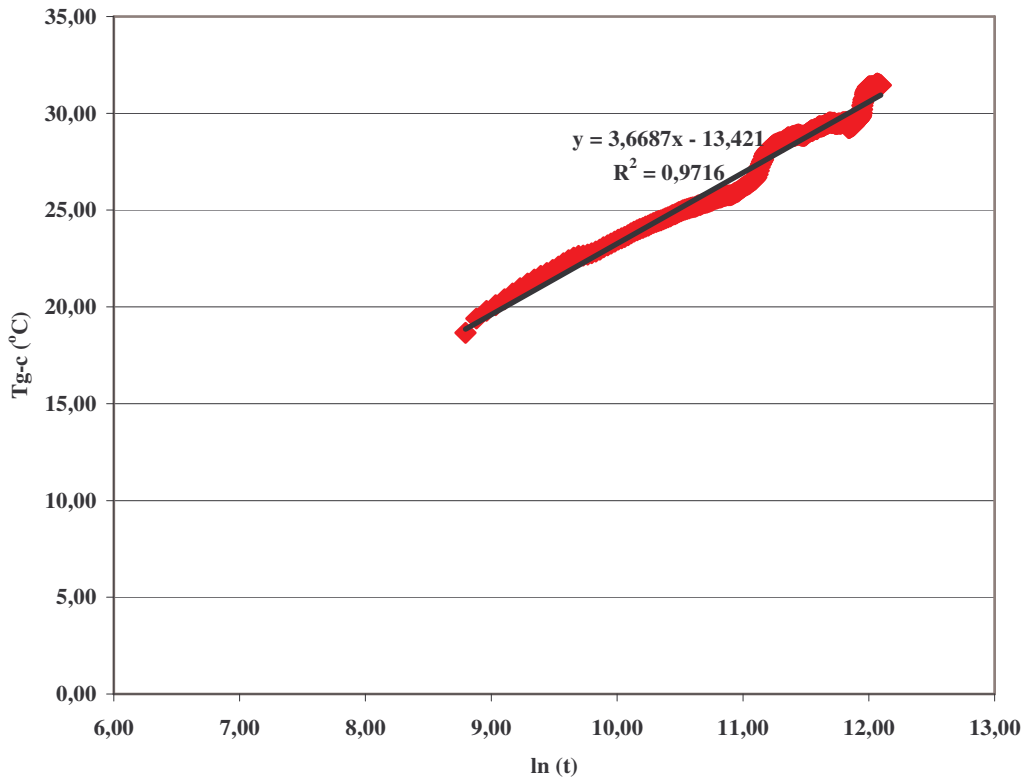
λ	Isıl iletkenlik (W/mK),
Q	Uygulanan ısı güç (kW),
T_{g-c}	Giriş- çıkış ortalama akışkan sıcaklığı (K),
r_b	Kuyu yarıçapı (m),
T_{sur}	Kuyu ilk sıcaklığı (K),
α	Isıl yayılım (m^2/s),
H	Efektif kuyu derinliği (m),
t	Zaman (s),
R_b	Isıl direnç ($K/(W/m)$),
γ	Euler sabiti (0.57).

Cihaz ilk önce, 60 m’lik kuyu için teste hazırlanmıştır, toplam 48 saat test yapılmıştır. Bu deney sırasında 1 ısıtıcı devreye alınmıştır, yani 3 kW’lık ısıtıcı kullanılmıştır. Bu test sonucunda oluşan değerler aşağıda Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 60 m’deki IDT sonuçları

Test süresi	48 saat
Kararlı toprak sıcaklığı	15.6 °C
Atılan ısı	4.90 kW
Sondaj derinliği	60 m
Sondaj çapı	160 mm
Isıtıcı gücü	3 kW

Toplam 48 saat süren bu işlem sonucunda giren ve çıkan su-antifriz sıcaklıklarının ortalaması (T_{g-c}) alınarak logaritmik zamana ($\ln(t)$) karşı grafiği Şekil 3.10’daki gibi çizilmiştir. Eğilim çizgisi sayesinde R^2 değeri 0.9716 olarak bulunur. Buradan elde edilen doğrunun eğimi (k , (3.1) numaralı eşitlik), (3.2) numaralı eşitlikte yerine konularak efektif λ değeri hesaplanır. Daha sonra bulunan bu değer (3.1) numaralı eşitlik’de yerine konularak R_b hesaplanır. 60 m’lik kuyuda yapılan deney sonucunda dolgu bölgesinin ısı iletkenliği (λ) 1.70 W/mK olarak hesaplanmıştır. Dolgu bölgesinin ısı direnci ise 0.05 K/(W/m) olarak hesaplanmıştır.

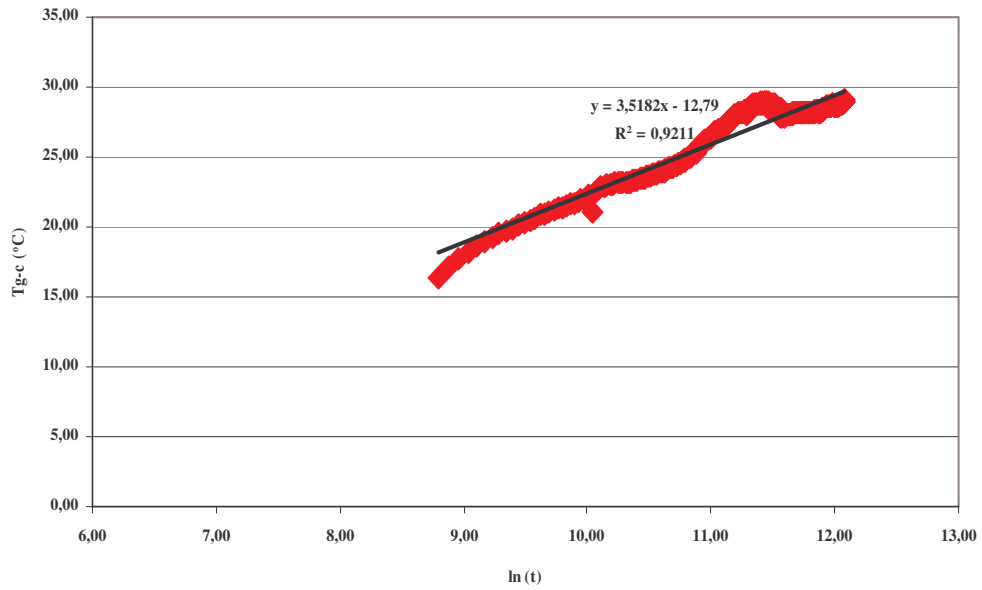
**Şekil 3.10** T_{g-c} 'nin logaritmik zamana karşı grafiği

Daha sonra test cihazı, 90 m’lik kuyu için teste hazırlanmıştır. Bu deney’de 2 adet ısıtıcı açılmıştır, yani toplam $2 \times 3 = 6$ kW’lık ısıtıcı kullanılmıştır. Bu test sonucunda oluşan değerler aşağıda Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3 90 m’deki IDT sonuçları

Test süresi	48 saat
Toprak sıcaklığı	15.6 °C
Atılan ısı	4.90 kW
Sondaj derinliği	90 m
Sondaj çapı	160 mm
Isıtıcı gücü	6 kW

Toplam 48 saat süren bu işlem sonucunda giren ve çıkan su-antifriz sıcaklıklarının ortalaması (T_{g-c}) alınarak logaritmik zamana ($\ln(t)$) karşı grafiği Şekil 3.11’deki gibi çizilmiştir. Eğilim çizgisi sayesinde R^2 değeri 0.9211 olarak bulunur. Buradan elde edilen doğrunun eğimi (k , (3.1) numaralı eşitlik), (3.2) numaralı eşitlik’de yerine konularak efektif λ değeri hesaplanır. Daha sonra bulunan bu değer (3.1) numaralı eşitlik’de yerine konularak R_b hesaplanır. 90 m’lik kuyuda yapılan deney sonucunda dolgu bölgesinin ısı iletkenliği (λ) 1.70 W/mK olarak hesaplanmıştır. Dolgu bölgesinin ısı direnci ise 0.03 K/(W/m) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, hata analizi de yapılmıştır.



Şekil 3.11 T_{g-c} 'nin logaritmik zamana karşı grafiği

60 ve 90 metrelik kuyularda yapılan IDT sonuçları literatür ve bu cihazın İstanbul’da kurulan sistemler üzerinde alınan bilgilerle kıyaslanmasıyla olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Isıl iletkenliği artırmak için literatürde bir çok çalışma vardır.

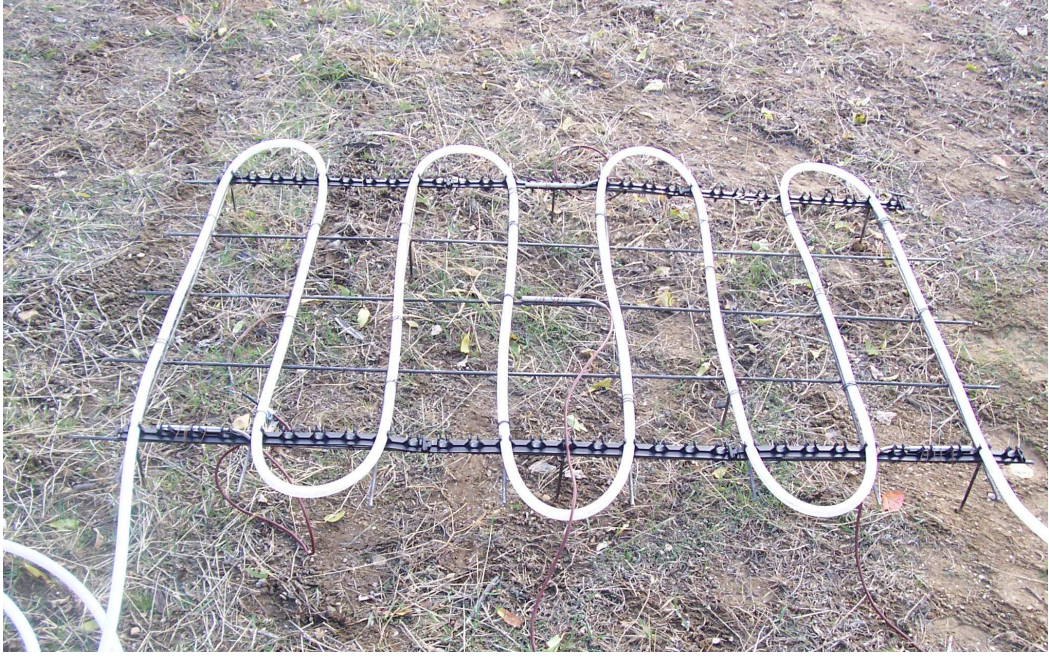
3.3. Kar Eritme Sistemlerinin Hazırlanması

Kar eritme sistemlerinde hem beton hem de asfalt bloklar kullanılabilir. Ancak asfaltın ısı iletkenliği betondan düşüktür. Bu yüzden gerekli akışkan sıcaklığı birbirlerine göre farklılık gösterir. Sıcak sulu kar eritme sistemlerini içeren beton bloklar, bir alt taban, genleşme çekilme bağlantıları, güçlendiriciler ve bloğun çatlamasını önlemek için tasarımda drenaja yer verilmelidir.

Bu çalışmada, kar ve buzun erimesini gözlemlemek için köprü ve yer modelleri tasarlanmıştır. Köprü ve yer modelleri için ayrı ayrı 120x170x20 cm boyutunda birer kalıp hazırlanmıştır. Ayrıca boruların rijitliğinin sağlanması ve inşa edilen modelin dayanıklılığı için Şekil 3.12’de görülen bir demir donatı hazırlanmıştır. Donatıdaki demir çubuklar arasındaki mesafe 20 cm’dir. 16 mm çaplı yerden ısıtma borusu, borular arası mesafe 20 cm ve kalıp kenarından 15 cm olacak şekilde döşenmiştir. Her bir blokta serili ısıtma borusunun uzunluğu 8.3 m’dir. Köprü ve yer modelinde iç sıcaklık değerlerini ölçmek için ısı çifti (beton uyumlu probu ile) kullanılmış ve ölçülen sıcaklık değerlerini kaydetmek amacıyla data loggere bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi 16 mm çapındaki yerden ısıtma borusu demir donatıya tutturularak kalıp içine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.12 Köprü ve yer modeli için demir donatının görünümü



Şekil 3.13 Köprü ve yer modeli için 16 mm PX-b borunun ve sıcaklık ölçerlerin donatıya yerleşiminin görünümü

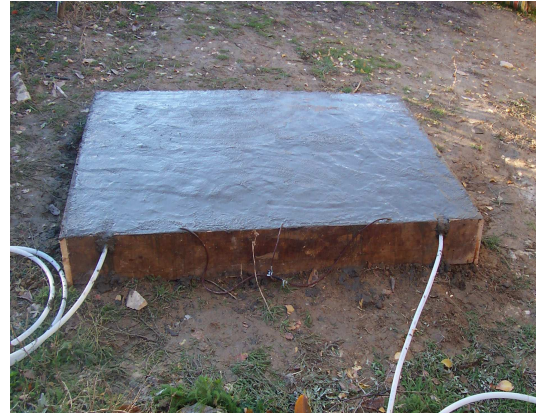
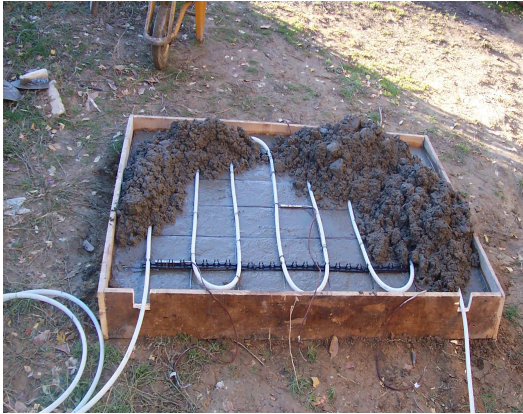
Kullanılan köprü ve yer modelleri ile sondaj deliklerinin geometrik özellikleri Şekil 3.14’de verilmiştir.

Köprü altındaki taşınım ile olan ısı transferinin köprü yüzeyindeki kar ya da buzun erimesine etkisini araştırmak için 2 metre yüksekliğinde bir sehpa hazırlanmıştır. Sehpanın üstüne 120x170x20 cm boyutlarındaki kalıp yerleştirilmiştir. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi 20 cm yüksekliğindeki kalıp 13 cm’e kadar harç ile doldurulmuştur.



Şekil 3.15 Borulu demir donatının beton bloğa yerleşiminin görünümü

Demir donatılı borunun üzeri Şekil 3.16’da iki kısımda gösterildiği gibi harçla doldurularak model tamamlanmıştır.



Şekil 3.16 Boru ve sıcaklık ölçerlerin üstünün harç ile doldurulmasının görünümü

Köprü ve yer modellerinin tam orta kısmına Şekil 3.17’de gösterildiği gibi kar ve buz eritme sensörü yerleştirilmiştir. Kar birikimi veya buzlanma oluşacak koşulları otomatik olarak algılayıp bu bilgiyi termostata ileterek sistemin kendiliğinden devreye girmesini sağlar. Sistem

yalnızca gerek olduğunda devreye girip çıktığı için enerji harcaması minimum düzeyde kalır. Sensör, köprü bloğu ortasına etrafı beton ile doldurularak üst kısımdaki piring bölgesi yere paralel, yukarıya bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu sensörün ve sistemde kullanılan termostatin(Devireg 850) montajdan önceki görünümü Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.17 Sensörün köprü bloğu içine yerleştirilişi



Şekil 3.18 Çalışmada kullanılan termostat, sensör ve kılıfının görünümü

Modellere, yüzeyden 7 cm derinlikte döşenen 16 mm çapındaki boruların modellere giriş ve çıkış kısımlarından itibaren izolasyonu yapılmıştır (Şekil 3.19). Böylece boru içinde dolaştırılan antifriz+su karışımından çevre ortama (atmosfere) olan ısı kaybı azaltılmıştır.



Şekil 3.19 Boruların izolasyonun görünümü

Köprü ve yer modelinin birlikteki en son görünümü ise Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20 Köprü ve yer modelinin birlikte görünümü

Çalışmamızda şüphesiz en önemli hususlardan biri, dış ortamın hava sıcaklık değerini ve nem oranını hızlı ve doğru bir şekilde algılayarak çeşitli buz ve kar problemlerini çözmek için kullanılan elektronik bir aygıtın yaptığı işlevdir. Şekil 3.21’de bu işlevi yapan Devireg 850 termostatın elektrik bağlantısı ile pano içindeki görünümü verilmiştir.



Şekil 3.21 Termostatın elektrik bağlantısının olduğu pano içindeki görünümü

Bu elektronik aygıt, gerilimi ayarlamak için bir trafo ve sıcaklık-ıslaklık parametrelerini algılayan sensör ile birlikte çalışmaktadır. Devireg 850’de çalışma sıcaklığı ve ortam ıslaklığı gibi parametreleri iklim şartlarına göre değiştirme imkânı bulunmaktadır. Dijital ekranı ve ayar düğmeleri sayesinde Devireg 850 kişiselleştirilebilir. Elektronik termostatın gerilimini ayarlamak için bir adet trafo da kullanılmıştır. Kolayca ulaşılabilir şekilde, açılabilir kapak kullanılarak tam koruma sağlanmıştır. TKIP sisteminin enerjisini sağlamak için yapılan pano; termostat, trafo ve sigortalardan oluşur. Yapılan panonun elektrik devresi Şekil 3.22’de gösterilmiştir.

Toprağa, köprü ve yer modellerine yerleştirilen sıcaklık ölçerler yardımı ile ölçülen değerleri kayıt altına alan data logger cihazıdır. Bu cihazın bilgisayar ile bağlantısı yapılarak ölçümler ekrandan izlenebilmektedir. Data logger, 25 farklı kanallı bir AM25T çok düzeyli bir birleştirici ile sistem üzerindeki ısı çiftlerine bağlantı yapılarak kayıt yapmaktadır. Ayrıca 12 Volt'luk bir güç kaynağı da cihazın çalışması için gereklidir.

Bu çalışmada kullanılan U-borusunun malzemesi Polietilen SDR-11 olup borunun ısı özellikleri aşağıdaki Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 U-borusunun ana karakteristikleri [51]

Boru cinsi	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/(m K)
Isıl direnç (R_b)	0.0815 (m K)/W
Lineer genişleme katsayısı	0.17 mm/(m K)
Et kalınlığı	2.4 mm

Köprü ve yer modelinde ise polietilen PX-b çapraz bağlı boru kullanılmıştır. Bu borunun mekanik ve ısı özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir. Normal polietilen borular çeşitli işlemlerle çapraz bağlı polietilen boru haline dönüştürülmüşlerdir. Çapraz bağlanmış polietilen boruların düşük ve yüksek sıcaklık dayanımları, düşük sıcaklıktaki darbe mukavemeti, asit gibi çeşitli kimyasallara dayanımı iyidir. PX hammaddeden üretilen ürünler; sıcak ve soğuk dağıtım hatlarında, yerden ısıtma sistemlerinde, kalorifer tesisatlarında kullanılır.

Tablo 3.5 Köprü ve yer ısı değıştiricisi'nde kullanılan Px-b borusunun mekanik ve ısı özellikleri

	Değer	Sıcaklık (°C)
Yoğunluk	0.95 gr/cm ³	20
Çekme Dayanımı	2.9 kg/mm ²	20
Çekme Dayanımı	2 kg/mm ²	100
Kopma Uzaması	% 300	20
Kopma Uzaması	% 500	100
Elastik Modül	19000 kg/cm ²	-40
Elastik Modül	15000 kg/cm ²	0
Elastik Modül	12000 kg/cm ²	20
Elastik Modül	5000 kg/cm ²	80
Şor Sertliği	71 kg/mm ²	20
VICAT Yumuşama Sıcaklığı	140 °C	
Doğrusal Genleşme Katsayısı	1.4E-4	20
Doğrusal Genleşme Katsayısı	2.5E-4	100
Isıl Genleşme Katsayısı	2.1 x 10 ⁻⁴ K ⁻¹	20
Isı İletim Katsayısı	0.35 W/m °C	20
Çalışma Aralığı	+95 °C /-50 °C	

Topraktaki ısının ısı pompasına, ısı pompasından toprağa veya döşemeye taşınması TİD'de dolaştırılan bir akışkan ile olur. Salamuralar, yağlar ve glikollü su gibi değişik akışkanlar ısıyı akışkandan eritme bloğuna aktarmak için uygun çözümlerdir. Su, termodinamik ve ekonomik bakımdan oldukça uygun bir akışkan olmasına rağmen donma sıcaklığının 0 °C olması bir çok uygulamada problem çıkarır. Özellikle toprak sıcaklığının düşük olduğu bölgelerde donma problemine karşı donma sıcaklıkları daha düşük olan akışkanlar tercih edilmektedir.

Çevrimdeki antifriz+su çözeltisi, karışım yaptığı akışkanın kullanılacağı yerde donmamasını sağlamalıdır. Aksi takdirde antifriz kullanılmasının hiçbir yararı olmaz.

Genel olarak toprak ısı değıştiricilerinde kullanılan akışkan seçiminde aşağıdaki özellikler göz önüne alınır:

- Tutuşma özelliği
- Termodinamik özellikler
- Donma noktası
- Korozyon etkisi
- Zehirlilik
- Buharlaşma basıncı
- Ekonomiklik

Önemli bazı termofiziksel özellikleri de aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Isıl kapasitesi
- Viskozite
- Isıl iletkenlik

Isıl kapasite, viskozite, ısı iletkenlik gibi termofiziksel özellikler akışkanın karakteristiğini belirler. Akışkanın viskozitesi düşük ise sirkülasyon pompasının gücü düşer. Enerji depolama açısından akışkanın ısı kapasitesi iyi olmalı ve iyi bir ısı transferi sağlamak için akışkanın ısı iletkenliğinin iyi olması gerekir.

Propilen glikol – su, etilen glikol – su, etil alkol – su, silikon yağları, mineral yağları ülkemizde önerilen çalışma akışkanlarıdır. Güneş enerjisi uygulamaları için antifrogen N %52, antifrogen L %52, thermogen 1693 geliştirilen çalışma akışkanlarıdır. Etilen glikol daha çok otomotiv sektöründe propilen glikol ise genellikle yapıların ısıtılması işlemlerinde kullanılır [52]. Glikoller (Etilen glikol ve propilen glikol), orta düzeydeki maliyetleri, yüksek özgül ısı kapasiteleri ve düşük viskoziteleri nedeniyle ısı transfer akışkanı olarak son derece yaygın bir kullanıma sahiptirler [22].

Bu çalışmada kullanılan akışkan propilen glikol-su'dur. Propilen glikol – su, etilen glikol – su, potasyum asit salamurası, potasyum format salamurası ve silikon yağının bazı özellikleri aşağıdaki Tablo 3.6'da verilmiştir [53].

Tablo 3.6 Çeşitli salamura karışımlarının bazı fiziksel özellikleri

	(-10 °C)				(-35 °C)		
	Propilen Glikol-Su	Etilen Glikol-Su	Potasyum Asit Salamurası	Potasyum Format Salamurası	Silikon Yağı	Potasyum Asit Salamurası	Potasyum Format Salamurası
Yoğunluk (kg/m ³)	1050	970	1160	1280	920	1220	1360
Özgül Isı (kJ/kgK)	3.7	4.1	3.2	2.9	1.4	2.9	2.6
Isıl İletkenlik(W/mK)	0.43	0.41	0.48	0.5	0.1	0.43	0.43
Dinamik vis.(10 ⁻³ Pas)	18.9	12.6	6.4	4.5	5.5	59	29
Kinematik vis. (10 ⁻⁶ m ² /s)	18	13	5.5	3.5	6	48	14

Çevre sıcaklığı 0 °C ve daha düşük olduğunda eriyen kar ısıtma alanını terk ettikten biraz sonra donar. Sistem kapatıldığında bloğun altında kalan herhangi bir su kütlesi de donarak bloğun çatlamasına neden olur. Akıntı suyu uygun bir drenaj sistemi ile ya dışarı ya da donma kalınlığının altında boşaltılmalıdır. Eğer kar eritme yüzeyleri eğimli ise (örneğin rampalar) yüzey akıntı suyu en düşük noktada toplanabilir. Rampanın alt kısmına doğru boşaltmaya ek olarak, suyun toplandığı alanın yakınları donmayı önlemek için ısıtmaya gerek gösterebilir.

Kar eritme boruları bazı engellerden geçmesi gereken yerlerde (örneğin yağmur suyu ızgaraları) boru ve kablolar arasında mesafe düzensiz bir şekilde azaltılmalıdır. Duvar ve düşey

yüzeyler yakınında boruların düzenli yerleştirilmemesi nedeniyle, bu gibi yerlere ve olanak varsa düşey yüzeylere bir ek ısıtma kapasitesi sağlanmalıdır [22]

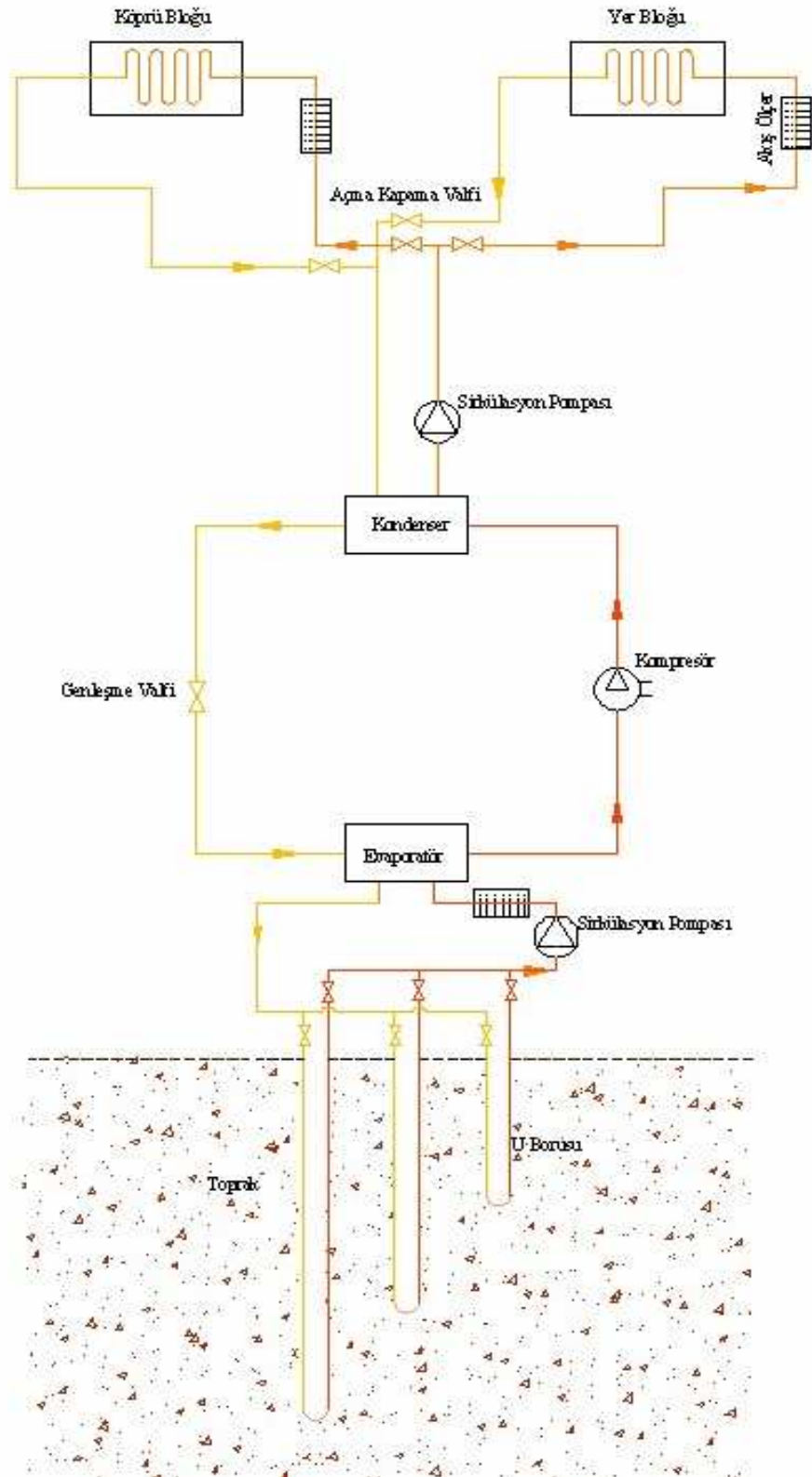
Sistem elle ve otomatik olarak çalıştırılmaktadır. Elle çalıştırma tamamen dur-çalış biçiminde olup, kar yağışı başladığında bir kişinin sistemi çalışır hale getirmesi gerekir. Sistem, bloklarda ve sistemin diğer elemanlarında gerilmeleri azaltmak için mümkün olduğunca kar yağışından önce bekleme süresince çalıştırılır. Blok üzerindeki karlar tamamen eriyip buharlaşana kadar sistem çalıştırılır.

Şekil 23’de sistemde kullanılan ısı pompasının görünümü, Şekil 3.24’de ise köprü ve yer bloğunun TKIP sistemi ile bağlantısının şematik olarak görünümü verilmiştir. Deneyler hem köprü hem de yer bloğu devrede iken yapılmıştır. Su-antifriz karışımının köprü ve yer bloğunda dolaşması için 3 kademeli kat kaloriferleri için tasarlanmış sirkülasyon pompası kullanılmıştır. TKIP sisteminin temelini oluşturan ısı pompası çevrimi 4 adet ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar kompresör, kondenser, evaporatör ve kılcal boru (genleşme valfi)’dur.

Bu sistem için, hermetik bir Freon kompresörü seçimi yapılmıştır. 2 HP (1.4 kW)’ lık FH 5524 F tipi tek fazlı kompresör seçilmiştir. Evaporatör ve kondenser aynı olup, Bakır’ dan imal edilen ve iç soğutucusu da Alüminyum olan TTE – 3 model no’lu, kapasitesi Freon 22 gazı ile çalıştığında 6000 kcal/h olan evaporatör/kondenser seçilmiştir. İçerisinden su+antifriz karışımı geçen Evaporatör/kondenser kısmının etrafı, içerisinden Freon 22 soğutucu akışkan geçen bakır borular ile sarılmıştır.



Şekil 3.23 Isı pompasının görünümü



Şekil 3.24 Köprü ve yer bloğunun, toprağın, boruların ve ısı pompasının bağlantı şematığı

TID içindeki su-antifiriz karışımını ısıtma periyodunda evaporatöre getirip evaporatörden de tekrar TID' ne gitmesini sağlayan 1 adet P tipi üç hızlı sirkülasyon pompası kullanılmaktadır.

Pompa elektrik besleme değerleri ile elektrik tesisat değerleri uygun olmalıdır. Pompaya gelen elektrik tesisatı ve bağlantıları mevcut normlara ve standartlar uygun olmalıdır. Pompa standartlara uygun olarak topraklanmış bir elektrik tesisatına bağlanmalı ve topraklanmalıdır. Pompanın montajı, kullanımı ve onarımı sırasında elektrikli cihazların kullanımındaki genel korunma esaslarına uyulması gerekir.

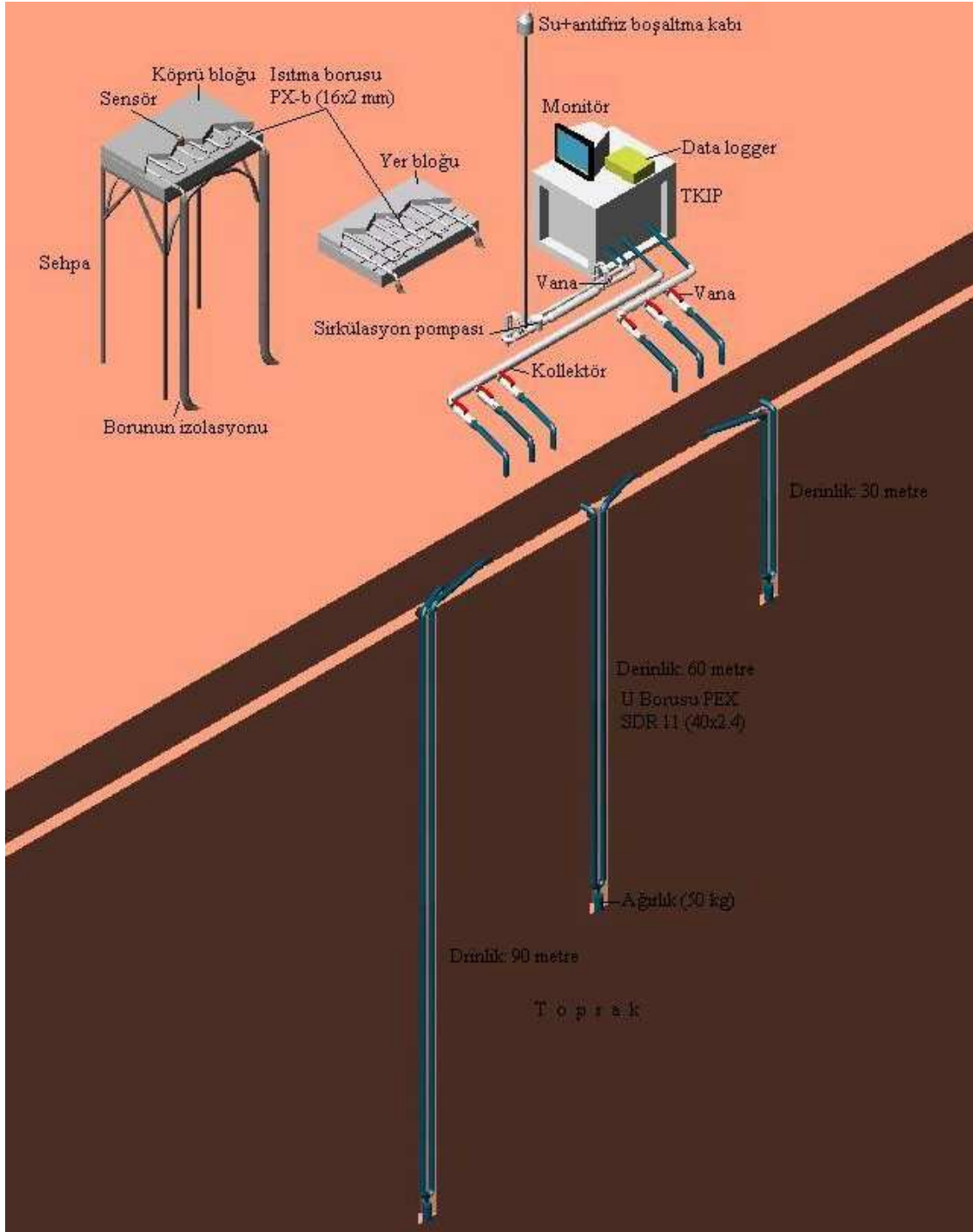
Kılcal borular küçük soğutma uygulamalarında termostatik genleşme valfinin yerine kullanılmaktadır. Kılcal boruların; kolay anlaşılması, montajı, düşük maliyet, güvenilirlik ve oynak parça olmaması gibi avantajları vardır. Kılcal boru, evaporatöre belirli gaz akışına izin vermelidir. Uzunluktaki % 2' lik değişme kondensasyon ısısında 1 K' lik fark yaratacaktır.

Kondenserdeki/evaporatördeki 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 açmaktadır. Bunu önlemek için ısı pompasının kondenseri/evaporatörü ile kılcal (Kondenser/evaporatör ve kılcal arasında gözetleme camı var) arasına 3/8" lik DCY 083 tipli bir adet kurutucu konmuştur. Kurutucu içinde bulunan silikajel maddesi soğutucu içindeki su buharını ve diğer yabancı maddeleri soğutucu gazdan ayırtmaktadır.

Sistem içerisinde dolaşan Freon 22 gazının dryer içindeki durumunu tespit etmek için bir de sistemde dryer ile kılcal arasına gözetleme camı konulmuştur. 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 düşük ve yüksek basınç presostatı konmuştur.

TKIP sisteminin en önemli kısmı olan toprak kısmı üç farklı derinlikten (30, 60 ve 90 m) oluşan kar veya buz eritme sisteminde kışın toprağın alt kısımları kararlı ve aynı zamanda dış havadan daha sıcak olduğu için sirkülasyon pompası ile kapalı çevrim halinde yer altında dolaştırılan su-antifriz karışımı toprağın ısınıp alarak ısı pompası ünitesine aktarır. Su-antifriz karışımı ile ısı pompası çevrimini sağlayan Freon 22 gazı arasındaki ilişkiyi evaporatör kısmı sağlar. Evaporatördeki Freon 22 gazı eşanşör vasıtasıyla su+antifriz karışımının ısınıp alır ve kompresör sayesinde kondensere sevk edilir. Kondenser’de dolaşan Freon 22 gazı ısınıp köprü ve yer modellerinde dolaştırılan su-antifriz karışımına aktarır. Böylece köprü ve yer modellerindeki dolaşan su-antifriz karışımının sıcaklığı artarak köprü ve yer bloklarında oluşan kar veya buz oluşumunun azalması sağlanır. Bu kısımlarda dolaşan su-antifriz karışımı kar veya buz erittikten sonra ısınıp tekrar kapalı çevrimle kondensere iletir. Sıcaklığı düşen su-antifriz karışımı kondenserde dolaşan Freon 22 gazına ısınıp aktardıktan sonra Freon 22 gazı kılcal boruya gelerek ısı pompası çevrimini evaporatörle tamamlamış olur. Şimdiye kadar anlatmış olduğumuz sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için 3 boyutlu genel görünümü çizilerek Şekil 3.25’de gösterilmiştir.



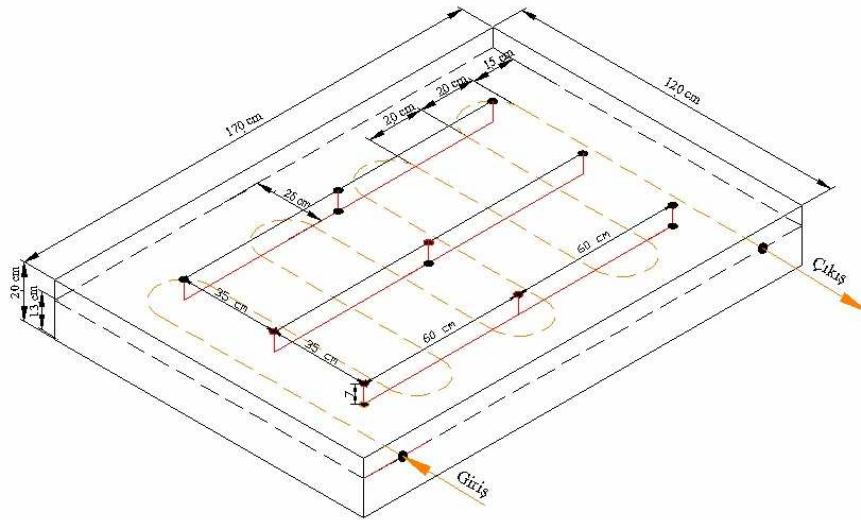
Şekil 3.25 Deney düzeneğinin üç boyutlu görünüşü

Kar yağmaya başlayıncaya kadar, eğer sistem çalıştırılmazsa birkaç saat boyunca kar birikmesine ve eritme için gerekli zamanın uzamasına neden olacağından etkili bir kar eritme elde edilemez. Otomatik kontroller, hafif bir kar yağışı ile birlikte sistemi devreye soktuğu ve yoğun kar yağışı başlayana kadar ilk ısınmayı sağladığı için uygun bir çalışma konumu elde edilir.

Köprü/yer bloğu içinde sıcaklık dağılımının zamanla değişimi, köprü/yer yüzeyinde bulunan kar ya da buzun erimesi için önemlidir. Deneyler esnasında her bir kuyunun köprü/yer bloğuna etkisi araştırılmıştır. Köprü/yer bloğuna etkisinin araştırıldığı kuyunun vanaları açık diğerlerinin vanaları kapalı durumda tutulmuştur. Yapılan deneylerde; kütlece %25'i antifriz olan su+antifriz çözeltisinin TKIP sistemine ve köprü/yer bloğuna giriş çıkış sıcaklıkları, debisi, kuyuların her 30 metredeki sıcaklıkları, yer/köprü bloklarının yüzey ve yüzeyden 7 cm aşağıdaki iç sıcaklıkları ölçülmüştür. TID'de dolaştırılan su+antifriz çözeltisinin debisi 30, 60 ve 90 metrelik kuyular için sırasıyla 0.43, 0.40 ve 0.36 lt/s olarak ölçülmüştür. Köprü bloğunda dolaştırılan su+antifriz çözeltisinin debisi 0.056 lt/s ve yer bloğunda ise 0.067 lt/s olarak ölçülmüştür. Deney sırasında vanalar kısılarak TID'de dolaştırılan su+antifriz çözeltisinin debisinin 0.36 lt/s, köprü ve yer bloğunda dolaştırılan su+antifriz çözeltisinin debisi ise 0.056 lt/s olarak ayarlanmış ve sisteme aynı debide girmesi sağlanmıştır.

10 Ocak 2007 tarihinde deneylere başlanmış ve 30 Mart 2007 tarihine kadar belirli günlerde deneyler yapılmıştır ve veriler (ölçülen değerler) 20 dakika ara ile kaydedilmiştir.

Açılmış olan üç kuyudan en az derinliğe sahip 30 metre derinliğindeki kuyunun köprü modeline etkisi ilk önce araştırılmıştır. Daha sonra 60 ve 90 m derinliğindeki kuyuların analizi yapılmıştır. 30 metre derinliğindeki kuyunun vanası açılarak TKIP sistemi saat 21:00'de çalıştırılmış ve saat 09:00'da durdurulmuştur. Test zamanının 21:00-09:00 arası seçilmesinin nedeni güneş ışığının etkisini ihmal etmektir. Islak ve sulu kar sınır şartlarında yer/köprü yüzey sıcaklıkları ve yüzeyden 7 cm aşağıda iç sıcaklıklar ölçülmüştür. Sıcaklık ölçüm noktaları detaylı olarak Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekil 3.27'de gündüz yapılan deneyler sonucunda yer ve köprü bloklarında kar yağdıktan sonra aşama aşama karın nasıl eritildiği fotoğraflar halinde sergilenmiştir.

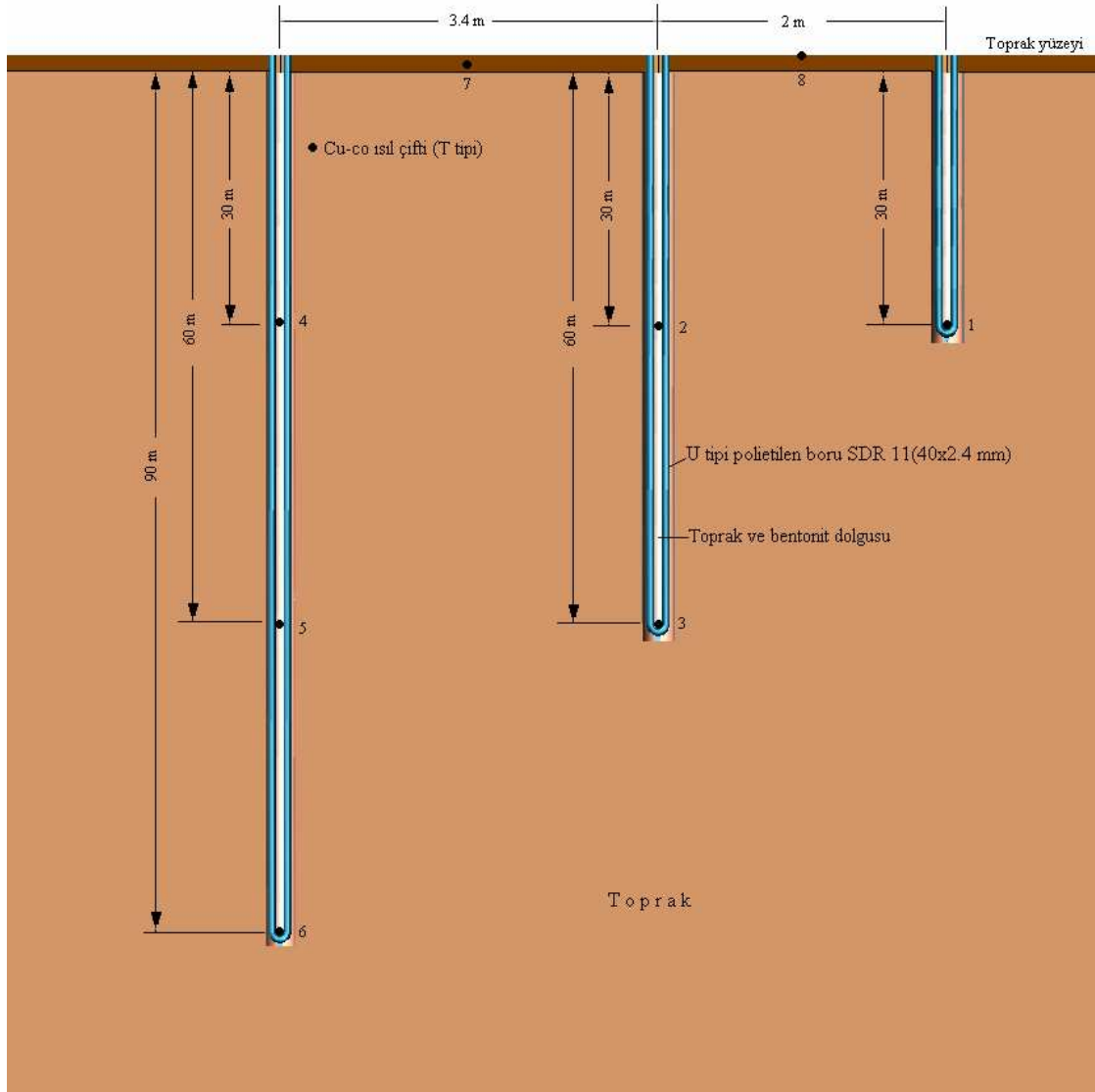


Şekil 3.26 Blokta sıcaklık ölçümü alınan noktalar

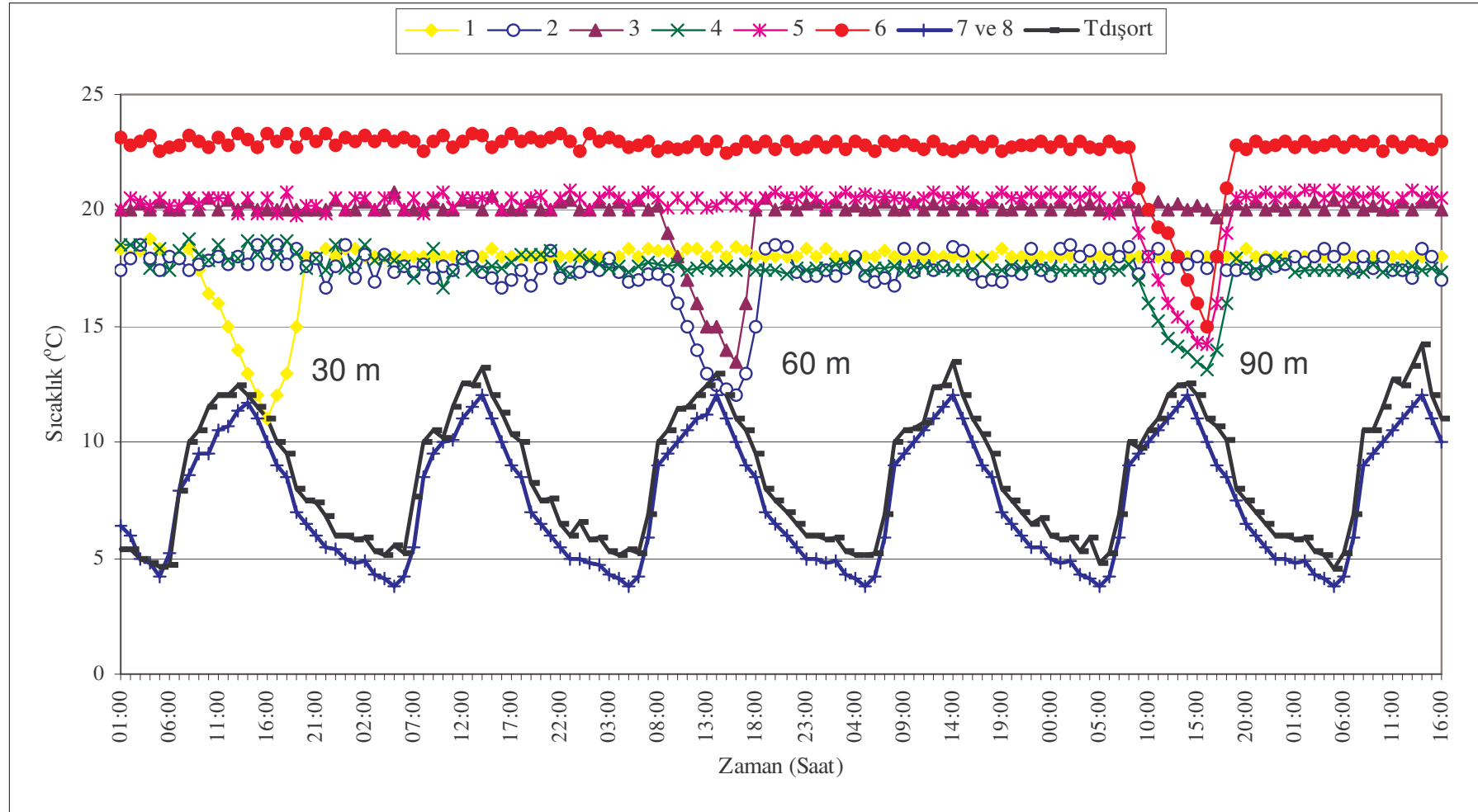


Şekil 3.27 Karın nasıl eritildiğinin aşama aşama görünümü

30, 60 ve 90 m'lik sondaj kuyularında 8 noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu noktalar Şekil 3.28'de verilmiştir. Tüm toprak sıcaklıklarının dış hava sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.29'da verilmiştir. 30, 60 ve 90 m'lik sondaj kuyuları bir gün aralıklarla çalıştırılarak toplam 5 gün'lük deneyler irdelenmiştir. 30 m derinliğinde deney süresince toprak sıcaklığı minimum 11 °C'ye düşmüştür.



Şekil 3.28 Sondaj kuyularında sıcaklık ölçümü yapılan noktaların görünümü



Şekil 3.29 Derinliklere göre toprak sıcaklığı ve dış hava sıcaklığının değişimi (10-15 Kasım 2006)

60 m'lik sondaj kuyusunda deney süresince minimum toprak sıcaklığı 13.43 °C'ye düşmüştür. 90 m'lik sondaj kuyusunda ise deney süresince minimum toprak sıcaklığı 15 °C'ye düşmüştür. Topraktan ısı çekildiğinde doğal olarak toprak sıcaklığı düşer. Bu düşüşün daha az olması için sondaj deliği içerisinde bulunan U-borusunun bentonit ile dolgusu yerine ısı iletim katsayıları daha yüksek olan dolgu malzemeleri ile doldurulmaları ve yazın köprü/yer modellerinde su+antifriz çözeltisini U-borusu içinde dolaştırarak köprü/yer modellerinde oluşan ısıyı toprakta depolamak toprağın ısı yükünü artırabilir.

Tablo 3.7'de Elazığ ili 2006-2007 yılı ısıtma dönemi için Elazığ ili Meteoroloji Müdürlüğünden (EMM) alınan çeşitli değerler verilmiştir [54].

Tablo 3.7 Elazığ ilinin 2006-2007 yılı ısıtma sezonundaki iklimsel verileri [54]

	Aylar			
	Aralık-06	Ocak-07	Şubat-07	Mart-2007
Ortalama dış hava sıcaklığı (°C)	0.7	-2.1	1.6	7.0
Minimum dış hava sıcaklığı (°C)	-4.2	-5.5	-2.2	1.8
Maksimum dış hava sıcaklığı (°C)	7.7	2.2	6.2	12.7
Ortalama bağıl nem (%)	43.3	72.2	68.1	55.6
Aylık ortalama rüzgar hızı (m/s)	1.9	1.8	1.9	2.8
Ortalama güneş ışınlamı (cal/cm ² saat)	180.43	157.06	215.98	327.61
Donlu gün sayısı (gün)	30	30	19	6
Bulutlu gün sayısı (gün)	11	15	13	16
Karlı gün sayısı	1	4	5	1
Karla örtülü gün sayısı	1	23	6	-
Karla karışık yağmurlu gün sayısı	-	1	-	-
En yüksek kar örtüsü (cm)	1	12	15	-

Analizde, TKIP sisteminin performans katsayısı (COP) aşağıda verilen Eşitlik 3.5 ile hesaplanmıştır. Hesaplama sistemin şebekeden çektiği toplam güç göz önüne alınarak hesap yapılmıştır [55].

$$COP = \frac{\dot{m}_{sa} C_{p,sa} (T_{sa,\xi} - T_{sa,g})}{\dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{W}_3} \quad (3.5)$$

Burada;

$\dot{m}_{sa}$ – Kondenserden geçen su+antifriz karışımının debisi, 0.40 (kg/s)

$C_{p,sa}$ – Su+antifriz karışımının özgül ısısı, 3.7 (kJ/kg K)

$T_{sa,\zeta}$ – Kondenser’den köprü/yer modeline geçen su+antifriz sıcaklığı (K)

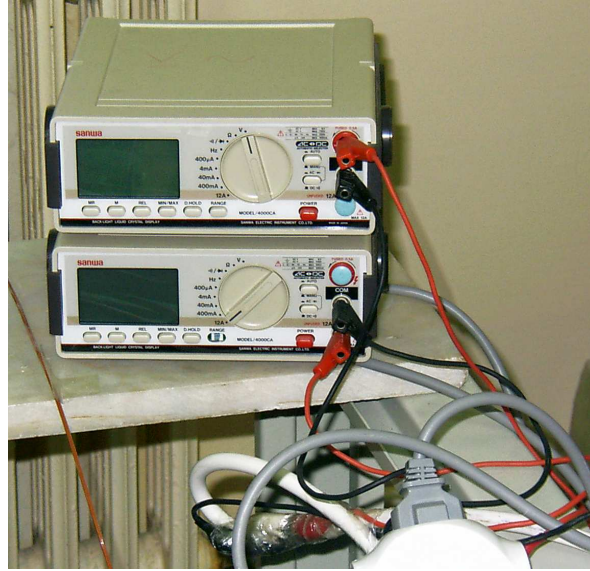
$T_{sa,g}$ – Köprü/yer modelinden kondenser’e gelen su+antifriz sıcaklığı (K)

$\dot{W}_1$ – Kondenser sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç (kW)

$\dot{W}_2$ – Evaporatör sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç (kW)

$\dot{W}_3$ – Kompresörün şebekeden çektiği güç (kW)

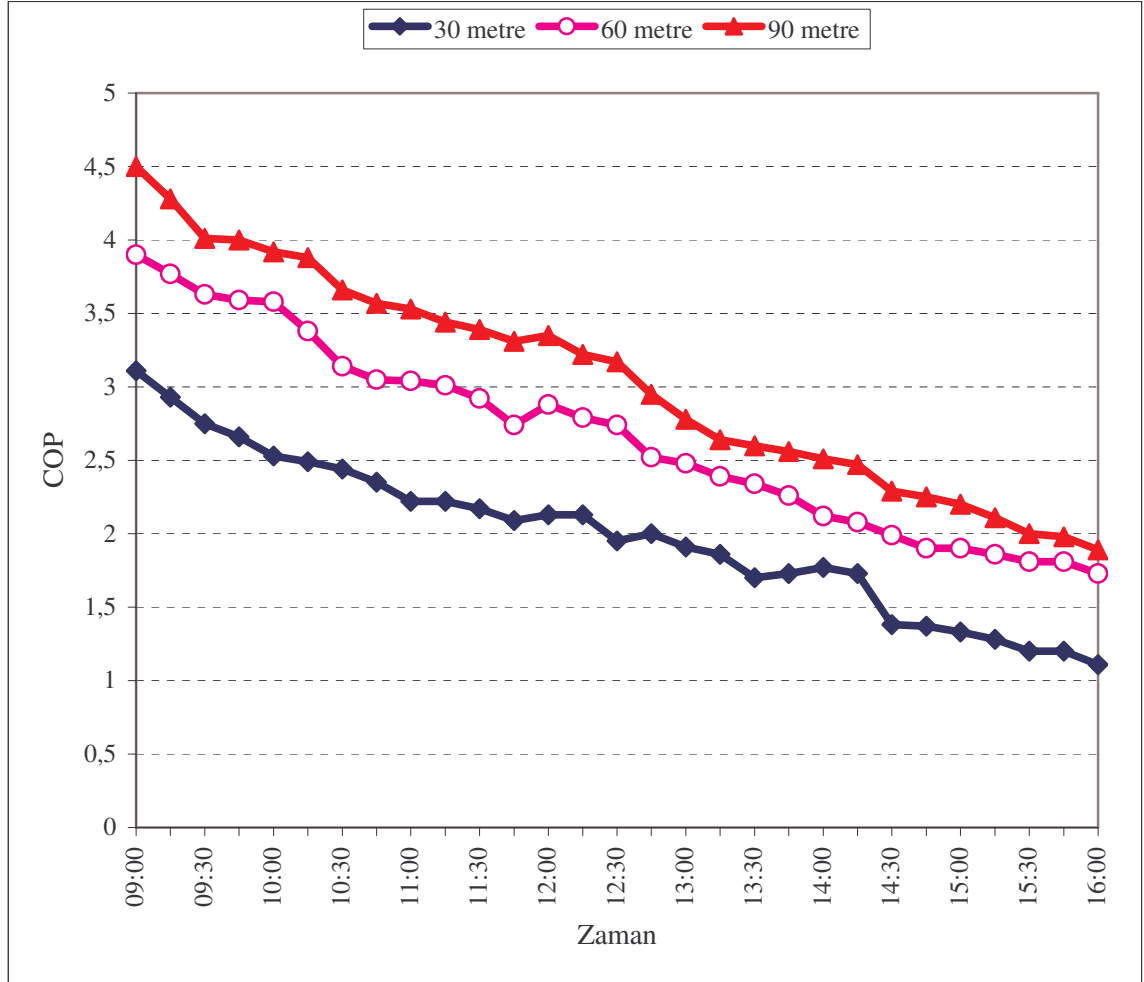
Sistemin şebekeden çektiği toplam güç yaklaşık 1400 W olarak ölçülmüştür, sistemin çektiği toplam akım ise 7 A olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler aşağıdaki Şekil 3.30’da görüntüsü verilen gerilim ve akım ölçer sayesinde yapılmıştır.



Şekil 3.30 Sistemde kullanılan gerilim ve akım ölçerin görüntüsü

Şekil 3.31’de 09:00-16:00 saatleri arasında yapılan deneyde üç farklı derinlikte tekli U-borusuna sahip sistemin performansının değişimi verilmiştir. Deneyler bir gün aralıklarla üç gün’de yapılmıştır. Toprak sıcaklıkları ve çevre şartlarının performans üzerindeki etkisi bir gün

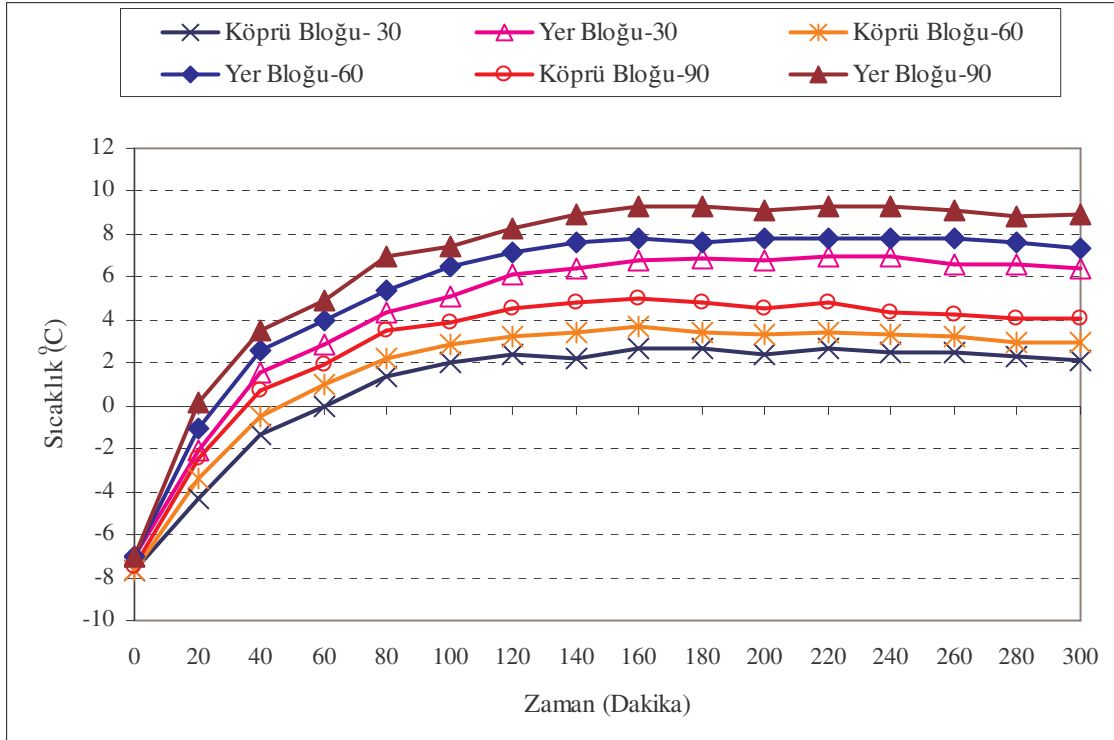
aralıklı günlerde fazla değişmediği için bu değerlerin etkisi karşılaştırma için ihmal edilmiştir. 30, 60 ve 90 m’de sırasıyla ortalama COP’ler 1.99, 2.66 ve 3.05 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi U-borusu derinliği arttıkça her 30 metre’de COP değerinde yaklaşık % 20’lik bir artış görülmektedir.



Şekil 3.31 Üç farklı derinlik için sistemin COP’un zamanla değişiminin görünümü

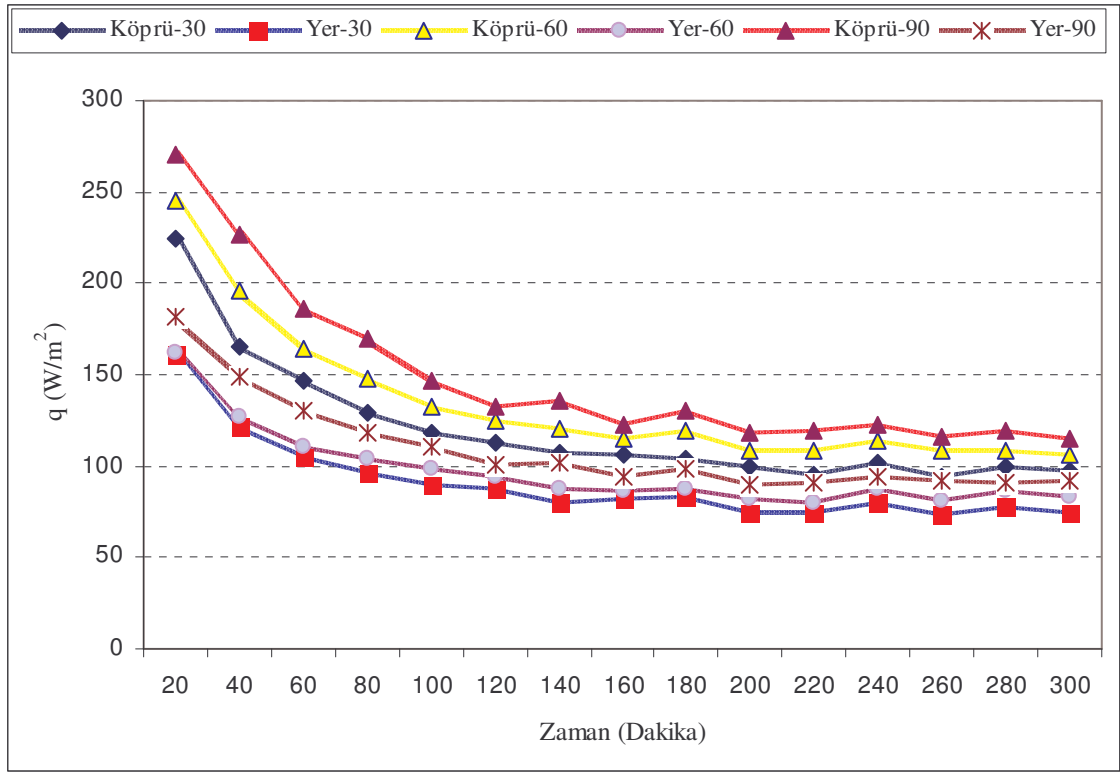
Şekil 3.32’de 30, 60 ve 90 m derinliğindeki sondaj kuyularının TKIP sistemi ile ayrı ayrı çalıştırılması sonucu köprü ve yer modellerinin yüzeyinden 7 cm derinliğe bırakılan 4 adet probdan alınan ölçümlerin ortalaması gösterilmektedir. Görüldüğü gibi köprü ve yer blokları kıyaslandığında köprü bloğunda ortalama sıcaklığın yer bloğundan daha düşük değerlerde olduğu ve 90 m’lik sondajın çalıştırılması sonucu da sırasıyla 60 ve 30 m’lik kuyulara göre en yüksek ortalama blok içi sıcaklık değerine ulaştığı görülmüştür. Deneyler güneş batımı sonrasında yapılmıştır. Güneş ışığının etkisi yoktur. Hava sıcaklığı -8 ile -7 arasında değişmektedir. 90, 60 ve 30 m’lik sistemlerin çalışması ile ortalama köprü bloğu içi sıcaklıklar

sırasıyla 2.84, 4.48 ve 0.91 °C olarak kaydedilmiştir. Ortalama yer bloğu içi sıcaklıkları ise sırasıyla 6.6, 5.41 ve 4.48 °C olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.32 Üç farklı derinlikteki sondaj kuyularının köprü ve yer bloğu içi sıcaklığa etkisi

Şekil 3.33’de deneysel çalışmada elde edilen köprü ve yer bloklarına transfer edilen ısı akılarının zamanla değişimleri verilmiştir. Su+antifriz çözeltisinin debisi köprü bloğu için 0.056 lt/sn, yer bloğu için 0.067 lt/s olarak ölçülmüştür. Köprü ve yer bloklarında su+antifriz çözeltisi debisinin aynı olması için yer bloğu giriş vanası kısılarak ayarlanmıştır. Her 20 dakikada su+antifriz çözeltisinin giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülerek kaydedilmiştir. Isıtma borusundan dolaştırılan su+antifriz çözeltinin özgül ısısı değeri tablolardan alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Köprü bloğunun ilk sıcaklık değeri yer bloğuna göre düşüktür. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasındaki sıcaklık farkının azalması ile ısı transferi hızı düşmüştür. Şekil 3.26’da görüldüğü gibi köprü modelinde 30, 60 ve 90 m derinliğindeki sistemlerin çalıştırılmasıyla ortalama ısı transfer hızları 120, 134 ve 148 W/m² olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde yer modelinde ise sırasıyla 30, 60 ve 90 m sistemleri için ısı transfer hızları 90, 97 ve 108 W/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.33 Köprü/yer bloklarında ısı ısı transfer hızları

Deneysel çalışmada elde edilen diğer verilerin tezin sayısal çalışması ile kıyasının verilebilmesi için gerekli bilgiler tezin 4. bölümünün sonunda verilecektir.

4. SAYISAL ANALİZ

4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yazılımları

HAD yazılımları yabancı literatürde Computational Fluid Dynamics (CFD) olarak bilinen çok geniş kapsamlı yazılımlardır. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden ve deneysel sonuçlardan yola çıkarak geliştirilmiş bazı matematiksel yöntemler vardır. Bu yöntemlerin sayısal çözümlenmesi, karmaşık modeller için ancak bilgisayar desteği ile mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller bilgisayar desteği ile çok hızlı ve etkili bir şekilde çözülebilir. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından çözüm zamanı ve zorluğu da çok fazla artmaktadır. Üç boyutlu hassas çözümlemeler, günümüzde kullanılan hızlı ve bellek kapasitesi yüksek bilgisayarlar yardımı ile yeni yeni mümkün olmaktadır. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir bilgisayar yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesi çok yüksek birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler (Beowulf) gerekebilmektedir. Bu konudaki ihtiyaçları karşılamak için ULAKBİM, 2 X Intel (R) Xeon (TM) 2.80GHz işlemci, 2 GB bellek, 600 GB yerel disk içeren bir sunucu ve Intel (R) PIV 2.66 GHz işlemcili ve 1 GB bellek, 80 GB yerel diskli uç birimlerden oluşan 128 paralel bilgisayarlı Beowulf sistemini kurmuştur [56].

HAD analizleri için genel bir çözüm algoritması hazırlamak oldukça güç ve çok sayıda kişinin çalışmasını gerektirecek bir işlemdir. Literatürdeki sayısal çalışmaların çoğunda her problem için özel bir yöntem önerilir. Her bir problem için uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine bu konuda yılların birikim ve deneyimleri sonucu hazırlanmış Fluent gibi genel amaçlı HAD yazılımlarının kullanılması çok uygun ve doğru olacaktır.

4.1.1 Fluent programı

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımıdır. 1983'den bu yana dünya çapında bir çok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.

Fluent programı, çözüm bölgesini bir dizi kontrol hacmine (mesh'e) veya hücreye bölerek (sayısal ağ oluşturulması) kütle, momentum, enerji vs. için genel korunum denklemini kullanır.

Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı bir çok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcıya birbirinden farklı bir çok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar. Kolay kullanımı ile Fluent, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçme, performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek yine bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesini sağlar [57].

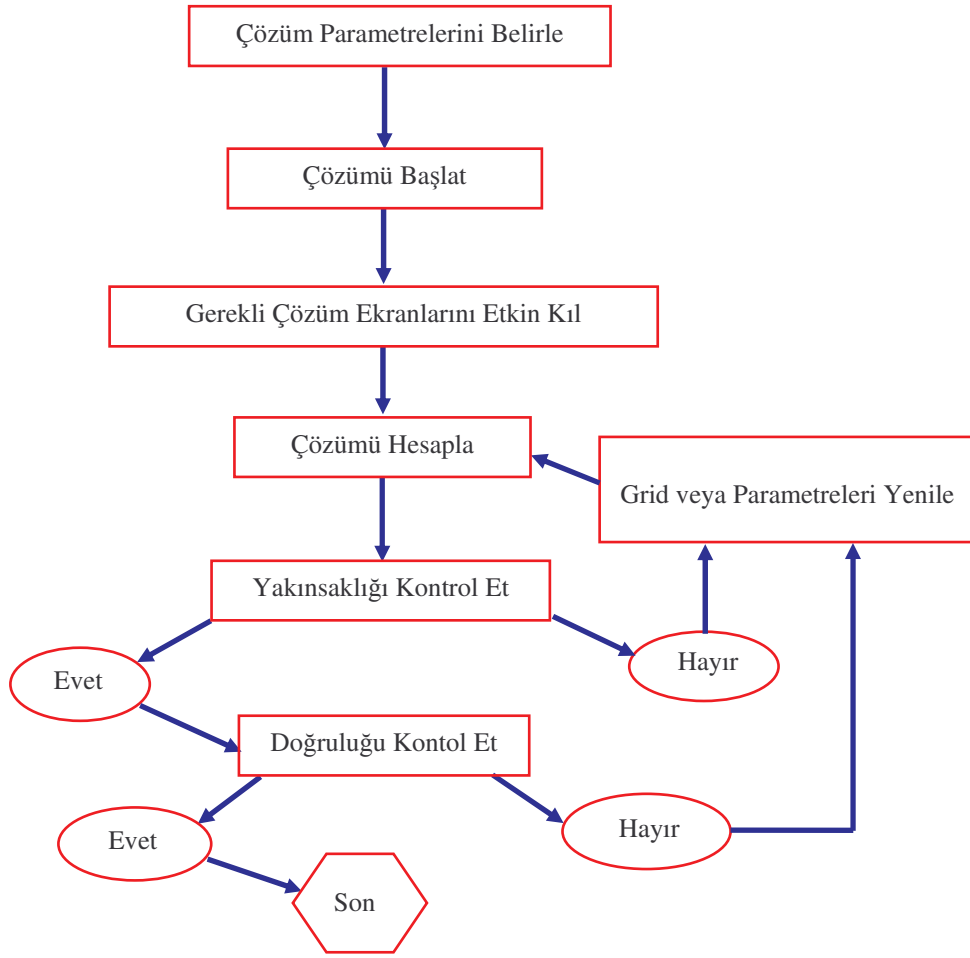
Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve ışıınım ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretir.

Fluent 6.2'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar.

Fluent programı ile bir problemi çözmek için aşağıdaki temel basamaklar takip edilir [58].

- Problem tanımlama ve ön işlem;
 1. İlgili modelin amaçlarını belirlemek,
 2. Modelleyeceğiniz alanı belirlemek,
 3. Tasarla ve gridi oluştur,
- Çözüm aşaması;
 4. Sayısal modeli kur,
 5. Hesapla ve çözümü görüntüle,
- Son işlem;
 6. Sonuçları yorumla,
 7. Değişiklikleri modele ekle.

Fluent 6.2'nın seri ve paralel sürümleri en yaygın UNIX, Windows/NT ve Linux üzerinde çalışmaktadır. Fluent programı ile çözüm yapılırken bir çözüm algoritmasına göre işlemler devam eder. Mevcut çözüm algoritması aşağıda Şekil 4.1'de verilmiştir [58].



Şekil 4.1 Çözüm algoritması

4.1.2. Gambit programı

Gambit, HAD yazılımları ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemdir. Gambit, HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırma ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır. Gambit, sunduğu araçlarla, kullanıcıya kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağa sahip olma imkanı tanır.

Gambit, sahip olduğu katı modelleme araçları sayesinde hem orta derecede karmaşık geometrilerin oluşturulmasına hem de gelişmiş geometri alım kapasitesi sayesinde UNIGRAPHICS, I-DEAS, Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS gibi profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak tanıyarak kullanıcıya büyük bir esneklik sağlar. Ayrıca kendisine ait “sanal geometri” kavramıyla dışarıdan alınmış modellerdeki en

büyük sorun olan geometri temizleme işlemini kolaylaştırarak sayısal ağ oluşumuna uygun modellerin elde edilmesine olanak sağlar.

Gambit, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkan verir. Bununla beraber, “boyut fonksiyonu” ve “sınır tabaka aracı” gibi araçları yardımıyla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol altında tutulmasına olanak sağlar [57]. Fluent gibi HAD yazılımlarının en büyük dezavantajı çözüm zamanı ve yüksek bellek gereksinimidir. Özellikle üç boyutlu modellerden hassas sonuçlar alabilmek için modeli daha küçük dolayısı ile daha fazla sonlu eleman ağına bölmek gerekmektedir ve bu durumda da daha fazla işlemci gücü ve bellek kapasitesine gereksinim duyulmaktadır. Ancak günümüzdeki yüksek hızlı işlemci (Core 2 Due) ve yüksek bellekli en az 512 RAM bilgisayarlarla bile yeterli sayıda sonlu eleman hücrelerine sahip üç boyutlu modeller çözülebilmektedir. Fluent ile sayısal çözümlerde, her 100.000 üç boyutlu eleman için yaklaşık 100 MB RAM’a ihtiyaç duyulur. Çok daha fazla elemanlı model çözümü için veya çözüm zamanını daha azaltmak için paralel işlemci teknolojilerinden (Beowulf) yararlanılabilir [56].

4.2. Isı Transferi Modeli

4.2.1. İletim ve Taşınım Isı Transferi

Isı transferi; iletim, taşınım ve ışıyım olarak adlandırılan üç ana yöntemle gerçekleşir. Fluent programında ısı transfer olayını gerçekleştirmek için fiziksel model bağlantıları, ısı kaynakları ve malzeme özelliklerini programa girmek gerekir [59].

Fluent programı katı ve/veya sıvı bölgelerdeki ısı transferine izin verir. Fluent programı aşağıda verilen enerji denklemini çözer.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p_r)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.1)$$

Burada k_{eff} efektif iletkenliktir ($k+k_t$, k_t türbülans ısı iletkenliğidir), $\vec{J}_j$, j’nin difüzyon akışıdır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk üç terim, sırasıyla iletimden, difüzyondan ve viskoz yayılmadan dolayı ısı transferini ifade etmektedir. S_h kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısıyı içermektedir. Diğer hacimsel ısı kaynakları aşağıda ifade edildiği gibidir.

$$E = h - \frac{p_r}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (4.2)$$

Sıkıştırılabilir akışlar için;

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p_r}{\rho} \quad (4.3)$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (4.4)$$

Fluent programında toprak, köprü ve yer modellerinde ısı transferini incelemek için gerekli; enerji modeli, viskoz modeli, sınır şartları ve malzemelerin özellikleri menüleri seçilerek düzenlenmiştir.

4.2.2. Viskoz Modeli

Laminer ve türbülanslı akımların Fluent programı ile modellenmesi mümkündür. Türbülanslı modelleme için k-ε model seçeneğinde standart, RNG ve Realizable k-ε model seçenekleri vardır. Standart k-ε model, kinetik enerji (k) ve bunun yayılımı (ε) için taşınım denklemleri üzerine kurulu yarı deneysel bir modeldir. 30, 60 ve 90 metre derinliğindeki kuyular için toprak ve köprü/yer sistemlerinde borulardan geçen su+antifriz çözeltisinin laminer olduğu hesaplanmıştır. Sayısal çalışmada toprak, köprü ve yer sistemlerinde viskoz modeli olarak laminer veya türbülans model seçilmiştir. Borularda dolaşan akışın laminer olsa bile modelin türbülanslı seçilmesi sonuçları değiştirmemiştir. Fluent programı girilen değerlere bağımlı olarak çözümü yapmaktadır. Girilen değerler türbülanslı akış için gerekli giriş değerleri değil ise fluent programı türbülanslı akış için gerekli parametreleri yok kabul eder ve çözümü tamamlar. Laminer akış için türbülanslı modelin seçilmesi; programcının türbülans parametrelerinin düzenlenmesinde zaman kaybetmesine, bilgisayarın ise çözüm için ek işlemler yapmasına neden olur. Çözümlerin doğruluğunu etkilemez.

Türbülanslı kinetik enerji (k) ve yayılım (ε) aşağıdaki geçiş denklemlerinden elde edilir [59].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4.6)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

G_k ortalama hız gradyetinden dolayı üretilen türbülans kinetik enerjisi, G_b kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans kinetik enerjinin üretimini, Y_M genleşme yayılımı, C_2 ve $C_{1\varepsilon}$ sabitleri, σ_k , ve σ_ε sırasıyla k ve ε için türbülans Prandtl sayısını, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ akışkanın viskozitesini, μ_t türbülans viskozitesini, S_k ve S_ε ise kullanıcı tanımlı terimleri ifade etmektedir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.7)$$

Buradaki C_μ sabit bir sayıdır. Boussinesq hipotezine uygun olarak G_k aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4.8)$$

Burada, S ortalama gerilme oranının tensörü olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4.9)$$

Pr_t enerji için Prandtl sayısı olup, standart ve realizable k - ε model için varsayılan değeri $Pr_t=0.85$ 'dir. Y_M genleşme yayılımı terimi Sarkar ve Balakrishan [60], tarafından önerilen şekilde modellenir.

$$Y_M = \rho \varepsilon 2M_t^2 \quad (4.10)$$

M_t türbülans Mach sayısıdır.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a_s^2}} \quad (4.11)$$

buradaki a_s ses hızıdır.

Çözümlerde kullanılan türbülans parametreleri (k - ε model sabitler) $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ olarak alınmıştır.

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (4.12)$$

v yerçekimi vektörüne paralel akış hızını u ise yerçekimi vektörüne dik akış hızını belirtmektedir.

4.2.3. Süreklilik ve Momentum Denklemleri

Fluent kütle ve momentum için korunum denklemlerini çözmektedir. Süreklilik denkleminin genel denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [59].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.13)$$

Eylemsiz bir yapıda momentumun korunum denklemi aşağıda ifade edildiği gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.14)$$

Bu denklemde P statik basıncı, $\bar{\bar{\tau}}$ gerilme tensörünü (aşağıda ifade edilmektedir), $\rho \vec{g}$ ve $\vec{F}$ yerçekimi kuvvetini ve dış kuvvetleri ifade etmektedir. $\vec{F}$, poroz ortam gibi tanımlı başka modele bağlı ifadeleri de içermektedir. Gerilme tensörü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right) \right] \quad (4.15)$$

μ moleküler akışkan viskozitesini, I birim tensörü ve sağ taraftaki 2. terim hacmin genişleme etkisini ifade etmektedir.

4.3. Sayısal Çözümü Yapılacak Modeller

Modellerin hazırlanmasında ve çözümünde, dünyada geniş bir kullanıma sahip Fluent HAD yazılımı kullanılmıştır. Katı ve sıvılarda oluşabilecek ısı transferini hassas bir şekilde çözmesi programın seçilmesinin temel nedenidir. Üç boyutlu model geometrilerini hazırlamak ve bu modelleri sonlu ağlarına bölmek için de Gambit programı kullanılmıştır.

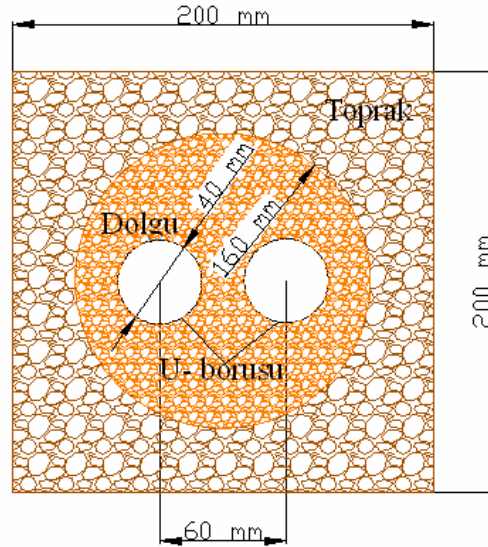
Model için çözüm yönteminin belirlenmesi için. Fluent programında "Segregated" ve "Coupled" olarak bilinen iki farklı yöntem ile çözüm yapılabilmektedir. Segregated yönteminde, iterasyonun her bir adımında elde edilen her bir değerin süreklilik, enerjinin korunumu ve türbülans açısından uygun olup olmadığı kontrol edilerek bir sonraki adım buna göre belirlenir. Coupled yönteminde, iterasyonun her bir adımında hesaplanacak olan bütün değerler belirlendikten sonra bu değerlerin süreklilik, enerjinin korunumu ve türbülans açısından uygun

olup olmadığı kontrol edilir ve bir sonraki adım buna göre belirlenir. "Segregated" yöntemi, "Coupled" yöntemine göre bilgisayar hafızasını daha az kullandığından daha hızlı çözüm yaptığı için tercih edilmiştir.

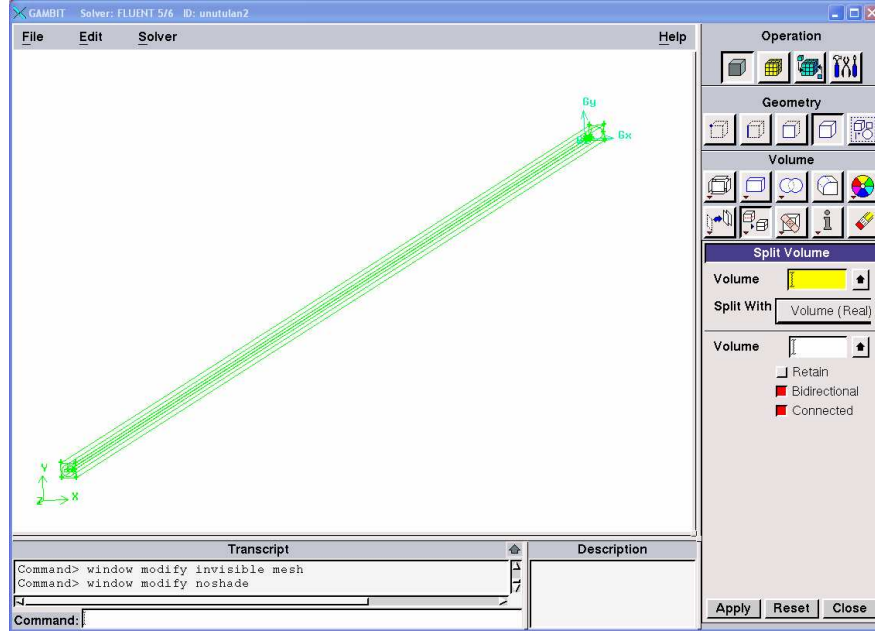
Bu sayısal HAD analizlerinde, üç boyutlu (3D), Segregated, zamana bağlı akım (Unsteady) ve zamandan bağımsız (Steady State) modelleri seçilmiştir. Akışın laminar olduğu hesaplanmıştır. Fakat, programda laminar veya türbülanslı modeller seçilerek aralarındaki fark araştırılmıştır. Ancak, laminar veya türbülanslı model kullanılarak yapılan çözümlerin sonuçları arasında fark görülmemiştir.

4.3.1. Toprak Modeli (Sondaj Deliği Kısım)

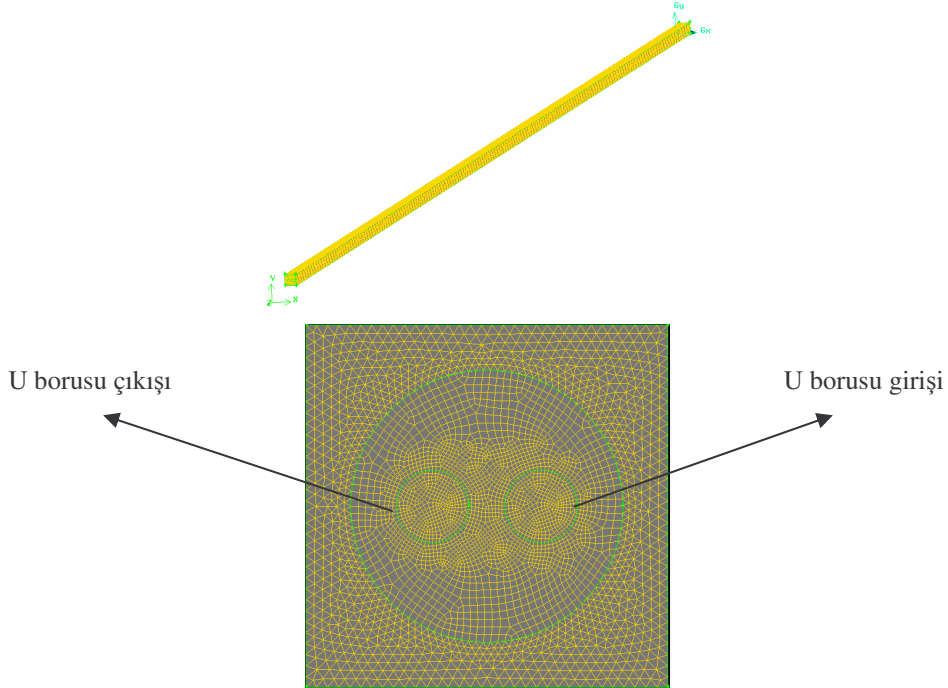
Toprak sıcaklığının U-borusunda dolaştırılan antifriz+su çözeltisine etkisi Fluent 6.2 programı kullanılarak araştırılmıştır. Gambit programı ile boru, bentonit ve toprağı içeren bir geometri hazırlanmıştır. Oluşturulan geometrinin boyutları Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Geometride U-borusunun ve ele alınan toprak kütesinin boyu, sondaj kuyusu (borehole) derinliğine göre (30 m, 60 m ve 90 m) değişmekle birlikte, toprak kütesinin yüksekliği kuyu derinliğinden 50 cm daha uzun alınarak geometri oluşturulmuştur. Gambit programında oluşturulan geometri Şekil 4.3’de verilmiştir. Oluşturulan modelde U borusunun et kalınlığı ihmal edilmiştir. Geometrideki boru giriş ve çıkış yüzeyleri için sayısal ağ (mesh) oluşturulurken quad-pave seçeneği, boru hacmi ve U borusu hariç bentonitin hacminin bulunduğu sondaj kuyusu için sayısal ağın oluşturulmasında Hex/Wedge-cooper seçeneği kullanılmıştır. Toprak hacmi için ise Tet/Hybrid-Tgrid seçeneği kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.2 Toprak geometrisinin boyutları (üstten görünümü)



Şekil 4.3 Toprak geometrisi



Şekil 4.4 Geometriye sayısal ağ (mesh) uygulamasının üç boyutlu ve üstten görünümü

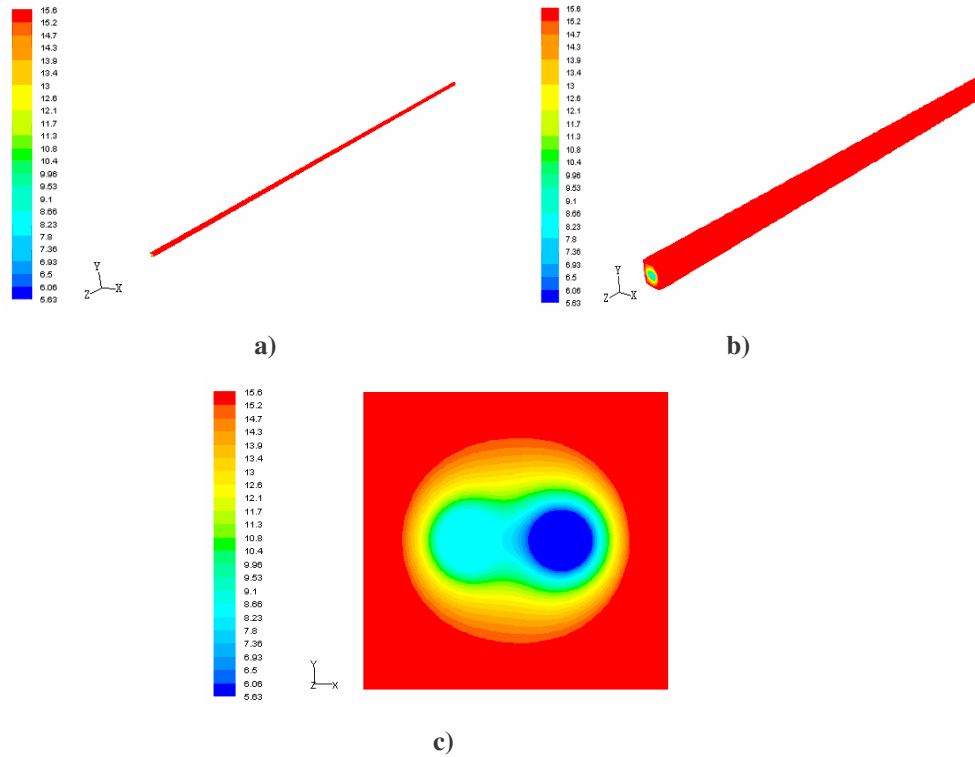
Oluşturulan geometri için Fluent programına toprak, bentonit ve su+antifriz çözeltisinin ısı özellikleri ve diğer veriler girilerek hesaplamalar yapılmıştır. Programa girilen malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Toprağın kararlı sıcaklığı 15.6 °C alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu değer 3. bölümde anlatılan ısı duyarlılık testinden alınmıştır.

Tablo 4.1 Modelde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kg K)	Isıl iletkenlik (W/m-K)
Su+antifriz	1111	3700	0.25
Bentonit	1540	900	1.70
Toprak	2000	800	2.55

4.3.1.1. 30 m Derinliğindeki Kuyunun Sıcaklık Dağılımı

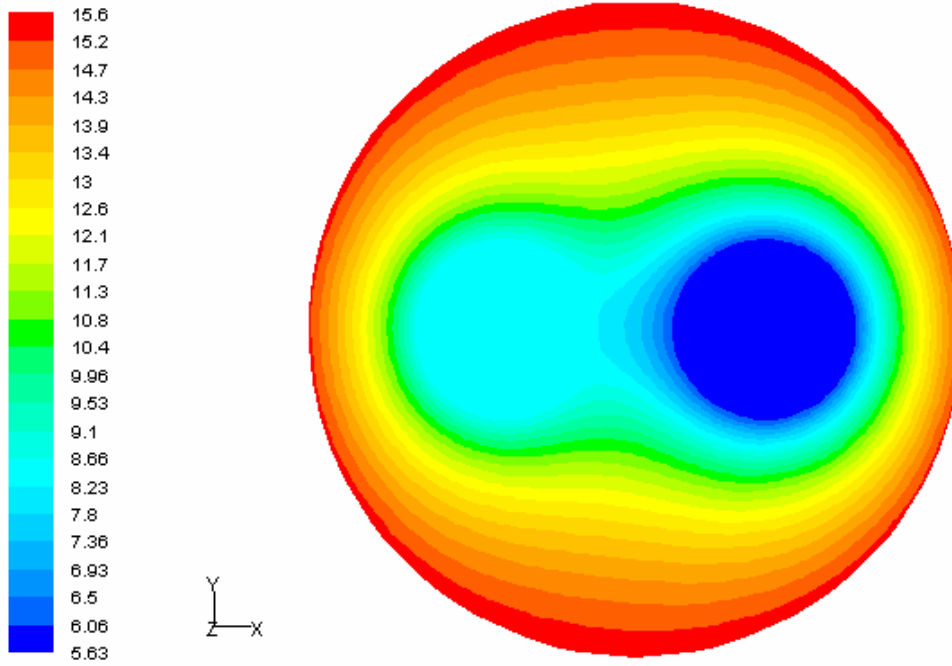
Kurulan model Şekil 4.2’de gösterilen alan üzerinde toprak, bentonit ve su+antifriz çözeltisi arasında ısı transferini sağlayacak şekilde çalıştırılmıştır. Program için toprak sıcaklığı olarak ısı duyarlılık testinden elde edilen 15.6 °C değeri kullanılmıştır. Yapılan çözümde toprak, bentonit ve su+antifriz çözeltisi arasında oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Toprak, bentonit ve akışkan arasında sıcaklık dağılımı (30 metre)

Yalnızca bentonit ve su+antifriz çözeltisinde sıcaklık dağılımını görmek için bentonit ve boru giriş yüzeyleri seçilerek sondaj deliği kısmı Şekil 4.6’da gösterildiği gibi yeniden

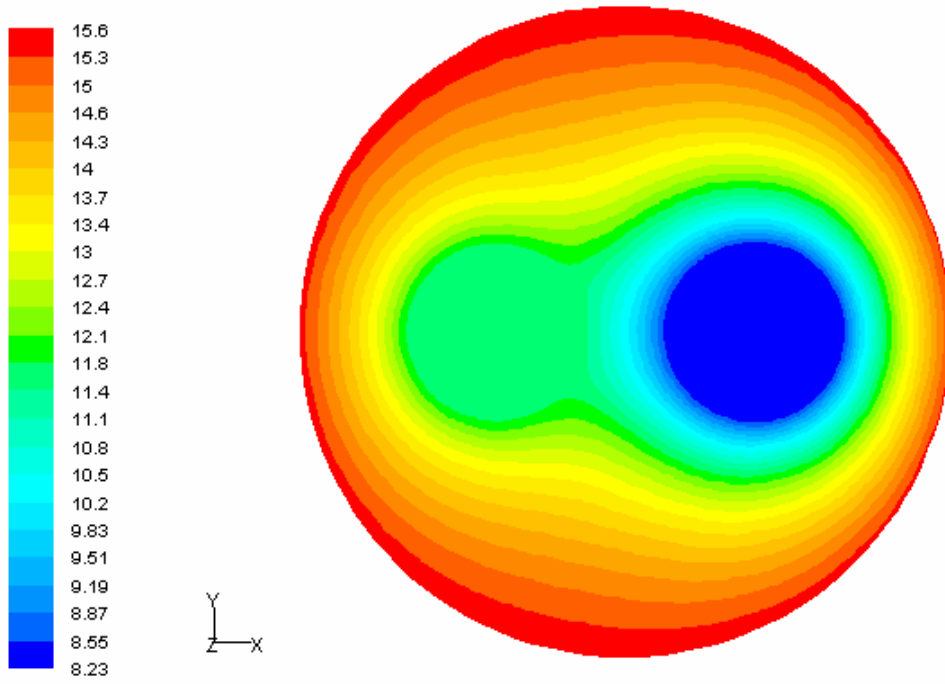
görüntülenmiştir. Şekillerde topraktan, bentonit malzemesine ve su+antifriz çözeltisine başarılı bir şekilde ısının transfer edildiği görülmektedir. Giriş-çıkış arasındaki ortalama sıcaklık farkı 2.29 °C olarak hesaplanmıştır. Antifriz+su çözeltisinin topraktan ısını aldktan sonra çıkış sıcaklığı 6.92 °C olarak hesaplanmıştır. Toprağın bentonit malzemesi ve su+antifriz çözeltisi üzerindeki sıcaklık etkisi daha çok kuyunun derinliği ile ilişkilidir. Yapılan bu modellemeler ile toprak sıcaklığının giriş ve çıkış sıcaklığına etkisi önceden planlanarak gerçek uygulamalar yapılacaktır.



Şekil 4.6 Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (30 metre)

4.3.1.2. 60 m Derinliğindeki Kuyunun Sondaj Deliği Sıcaklık Dağılımı

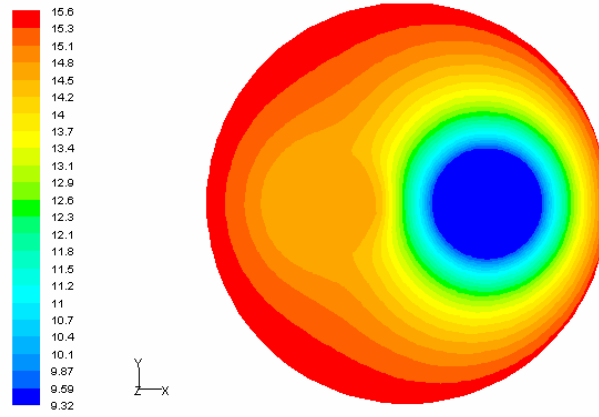
Antifriz+su çözeltisinin giriş-çıkış sıcaklığı ile toprağın kararlı sıcaklığı arasında ilişki 60 metre derinliğindeki kuyu için araştırılmıştır. Toprağın kararlı sıcaklığı olarak ısı duyarlılık testi sonucunda elde edilen 15.6 °C değeri kullanılmıştır. U borusunun girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkının 3.6 °C olduğu hesaplanmıştır. Antifriz+su çözeltisinin toprak ısını aldktan sonra çıkış sıcaklığı 10.72 °C olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7’de bentonit ve akışkan giriş-çıkış yüzeyleri arasında sıcaklık dağılımı görülmektedir.



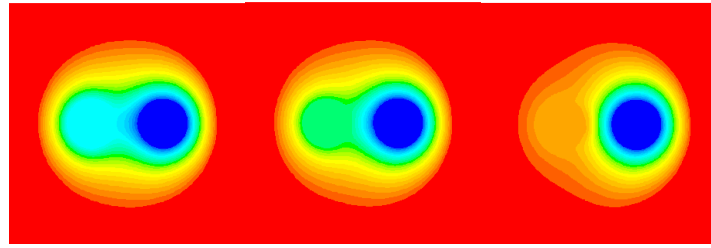
Şekil 4.7 Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (60 metre)

4.3.1.3. 90 m Derinliğindeki Kuyunun Sıcaklık Dağılımı

Toprak sıcaklığının, 90 metre derinlikteki sondaj kuyusunun dolgu malzemesine ve U borusunda dolaştırılan su+antifriz çözeltisine etkisi araştırılmıştır. U borusunun girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkının 4.63°C olduğu hesaplanmıştır. Yapılan analizde antifriz+su çözeltisinin toprak ısını aldktan sonra çıkış sıcaklığının 14.45°C olduğu görülmüştür. U borusu ile toprak arasındaki yüzey alanının, derinliğin artması ile artması sonucu, ısı transferi miktarını da arttırmaktadır. Isı transferi miktarı, antifriz+suyun debisi ($\dot{m}$), ısıl kapasitesi (c) ve giriş çıkış arası sıcaklık farkına (ΔT) bağlıdır. 90 metre derinliğinde kuyunun, borularda dolaştırılan akışkana ve bentonite etkisi ve 30, 60 ve 90 m sondaj kuyularında sıcaklık dağılımının birlikte üst görünümü Şekil 4.8’de verilmektedir.



a)



b)

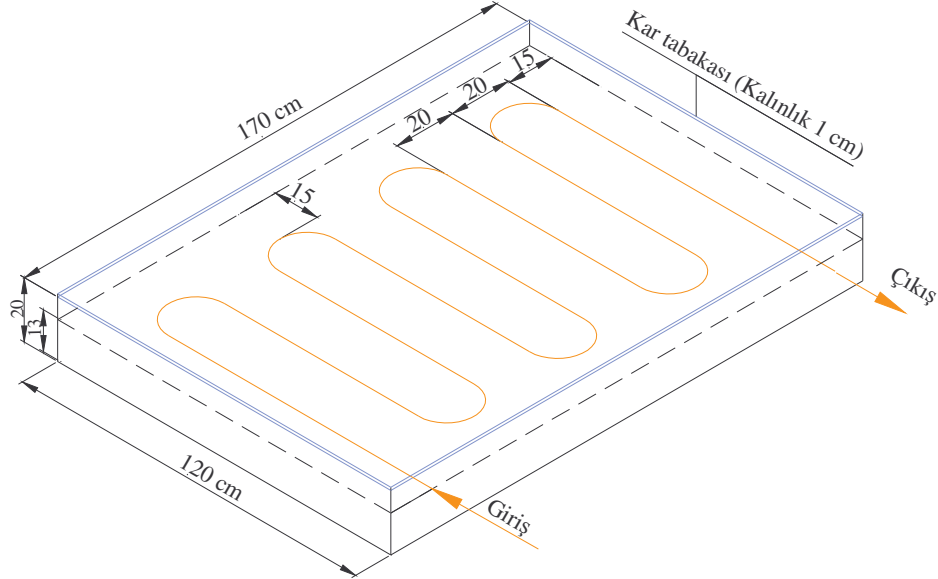
Şekil 4.8 a) Sondaj deliği sıcaklık dağılımı (90 metre) b) 30, 60 ve 90 m sondaj kuyularında sıcaklık dağılımının birlikte üst görünümü

4.3.2. Köprü ve Yer Bloğu Modeli

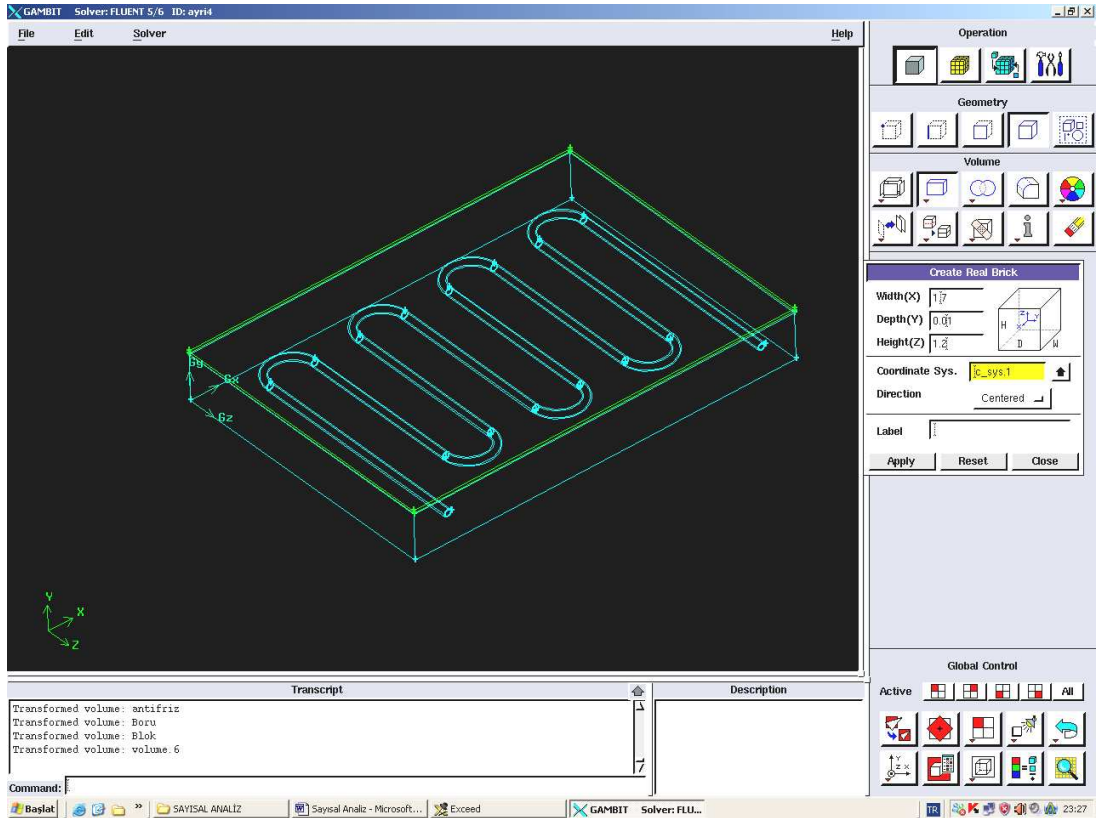
Köprü ve yer modelinin sayısal analizini yapmak için Fluent 6.2 programından yararlanılmıştır. Fluent programı çözüm için enerji, kütle, momentum ve süreklilik denklemlerini kullanmaktadır

Köprü ve yer modelinin oluşturulmasında, Şekil 4.9'da boyutları verilmiş geometri kullanılmış ve geometrinin çizimi için de Gambit 2.2.30 programından yararlanılmıştır. Oluşturulan modelde kullanılan bu boyutlar deneysel çalışmada bloğun inşası için de kullanılmıştır. Gambit programı ile oluşturulan geometrinin görünümü Şekil 4.10'da verilmektedir. Gambit programında çizimi yapılan bloğun üstünü tam olarak kaplayacak biçimde 1 cm yüksekliğinde kar hacmi de eklenmiştir. Akışkan, boru, blok ve kar hacimlerine sayısal ağ atılarak, sınır şartları belirlenmiştir. Geometrinin sayısal ağ biçimi Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Sınır şartları eklendikten sonra export seçeneğiyle Gambit programından çıkmıştır. Fluent programı çalıştırılarak Gambit programında çizilen ve sınır şartları tanımlanan geometri okutulmuştur. Fluent 6.2 programına modeli tanımlayan bilgiler girilerek zamana bağlı ve zamandan bağımsız çözümler yapılmıştır. Hazırlanan model köprü ve yer blokları için ayrı ayrı 30, 60 ve 90 m derinliklerdeki kuyulara uygulanmıştır. TKIP sistemi dikkate alınarak 30, 60 ve 90 m'deki kuyuların köprü ve yer bloklarına ve yüzeylerinde bulunan

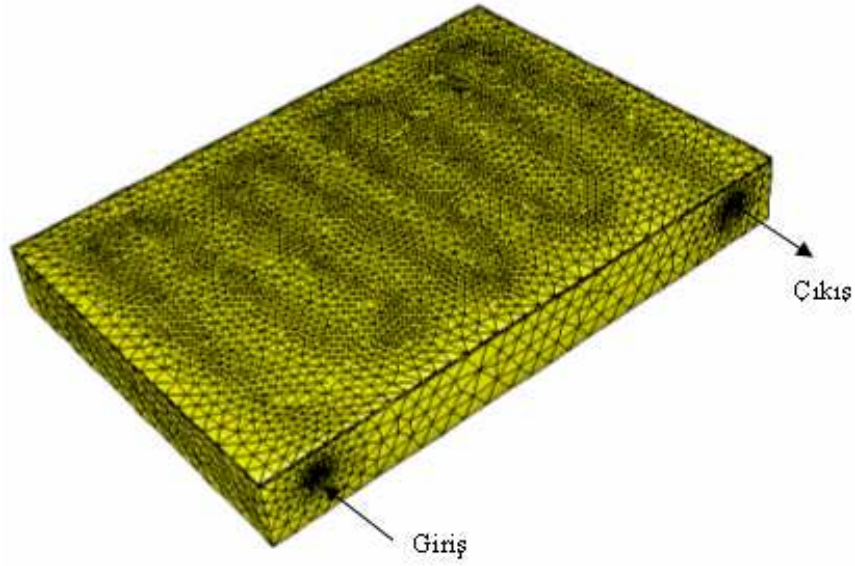
1 cm kalınlığındaki kar kütlesine etkisi incelenmiştir. Ayrıca TKIP sistemi devre dışı bırakılarak 90 metre derinlikteki kuyunun köprü ve yer bloklarına ve yüzeylerinde bulunan kar kütlesine etkisi incelenmiştir. Modellerin çözümleri aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.



şekil 4.9 Modelde kullanılan blok boyutları



şekil 4.10 Gambit programında modelin çizimi

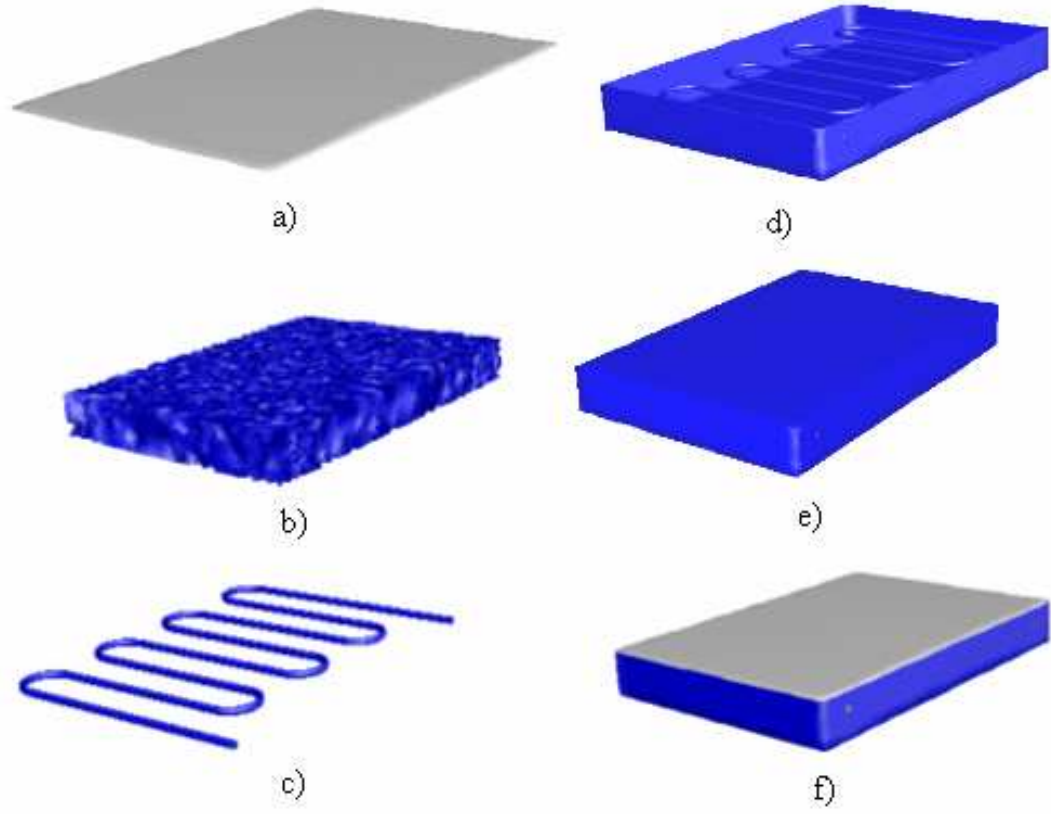


Şekil 4.11 Geometrinin sayısal ağ biçimi

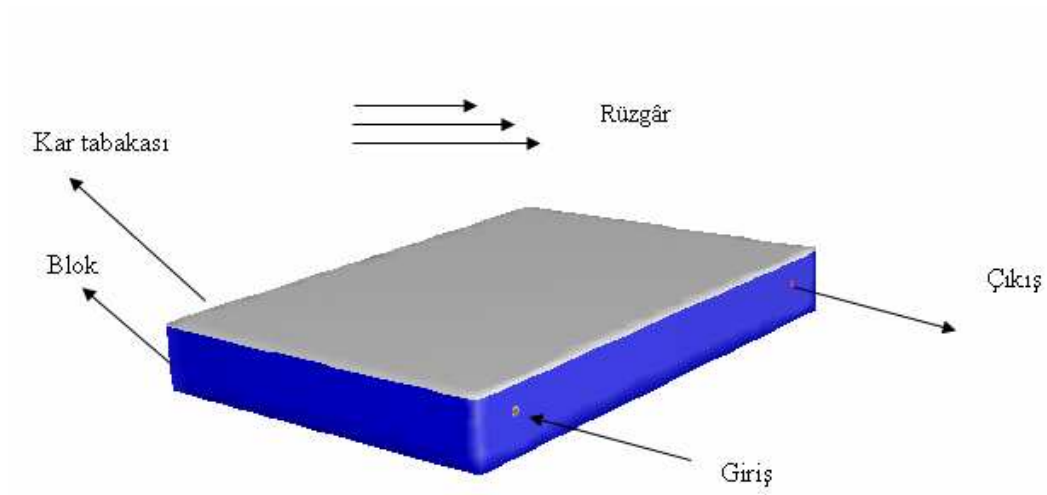
4.3.2.1. Model için Çözüm Yönteminin Belirlenmesi

Define menüsü altındaki materials menüsü seçilerek modelde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri girilmiştir. Define menüsü altında bulunan Boundary Conditions menüsü seçilerek açılan pencereden Gambit programında tanımlanmış sınır şartlarının özellikleri girilmiştir. Yapılan çalışmada “Define” menüsü altındaki “Models” menüsü seçilerek “Energy” seçeneği aktif hale getirilmiştir. “Define” menüsü altındaki “Models” menüsü altındaki Viscous menüsü seçilerek laminar modeli kullanılmıştır. Türbülanslı model seçilerek laminar modelin seçimi ile türbülanslı modelin seçimi arasındaki fark araştırılmıştır. Laminer veya türbülanslı model kullanılarak yapılan çözümlerin sonuçları arasında fark görülmemiştir. “Surface” menüsü altında “Point” seçilerek ölçüm noktaları belirlenmiştir. Define menüsü altındaki solver seçeneği altında bulunan segregated, 3D, Node Based ve steady/unsteady seçenekleri seçilmiştir. “File” menüsü altında “Write Case Data” seçeneği ile yapılan uygulamalar kaydedilmiştir. Programın elektrik kesintilerinden dolayı bilgilerin belli aralıklar ile kaydedilmesi için “Autosave” seçeneği kullanılmıştır. Program çözüm yaparken bloktaki bazı noktalarda ölçümler alarak grafik çizmesi için Solve-Monitors-surface menüleri düzenlenmiştir.

Köprü ve yer bloğu için hazırlanan modelde kullanılan elemanlar Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Şekil 4.12’de f grubunda verilen yüzeyde kar kütlesi bulunması halinin ayrıntılı gösterimi ise Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Köprü veya yer modeli : a) kar veya buz tabakası b) beton (harç) c) PEX boru d) borunun kalıp içine serilmesi e) beton blok f) karlı blok



Şekil 4.13 Yüzeyde kar bulunması halinin görünümü

Tablo 4.2 Köprü ve yer modelinde kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kg K)	Isıl iletkenlik (W/mK)
Antifriz+su	1111	3700	0.25
Bentonit	1540	900	1.70
Toprak	2000	800	2.55
Kar	200-600	1500	0.03-0.6
Buz	917 (0 °C'de)	1960 (0 °C)	2.0-2.1
Beton	2300	880	1.4
PEX Boru	950	1800	0.41
Hava	1.225	1006.43	0.0242

Blok üzerinden ve altından taşınım ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklemler ile ifade edilir [61].

$$Nu=0.54Ra^{1/4} \quad (10^4 < Ra < 10^7 \text{ -Laminer akış}) \quad (4.16)$$

$$Nu=0.15Ra^{1/3} \quad (10^7 < Ra < 10^{11} \text{ -Türbülanslı akış}) \quad (4.17)$$

Nu Nusselt sayısı (boyutsuz)

Ra Rayleigh sayısı (boyutsuz)

$$Nu=0.664Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{Laminer akış rejimi}) \quad (4.18)$$

$$Nu=0.037Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (\text{Karışık ve türbülanslı akış rejimleri}) \quad (4.19)$$

Re Reynold sayısı (boyutsuz)

Pr Prandtl sayısı (boyutsuz)

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_{hava}}{L} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.19, 4.20'de yerine yazıldığında 4.21 eşitliği elde edilir.

$$h_c = 0.037 \left(\frac{k_{hava}}{L} \right) Re_L^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (4.21)$$

k_{hava} Blok yakınındaki havanın ısı iletkenliği (W/m °C)

L Rüzgar yönünde ölçülen bloğun karakteristik uzunluğu, m

Pr Havanın Prandtl sayısı, Pr=0.7 olarak alınır.

Re_L Karakteristik L uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı

$$Re_L = \frac{VL}{\nu_{hava}} c_2 \quad (4.22)$$

V Blok yakınındaki tasarım rüzgar hızı, km/saat

ν_{hava} Havanın kinematik viskozitesi, m²/s

c₂ 1000 m/km x 1 saat/3600 s=0.278

Programa doğrudan rüzgar hızı değeri girilemediğinden rüzgar hızına bağlı olarak taşınım ısı transfer katsayısı (h_c) hesaplanmıştır. Elazığ ili 2006 yılı ortalama rüzgar hızı değeri 1.9 m/s (6.84 km/saat) [54] alınarak taşınım ısı transferi katsayısı 28.22 W/m²K bulunmuş ve bu değer yer modelinde blok üstü için köprü modelinde ise blok altı ve üstü için programa girilmiştir.

Köprü ve yer bloklarında transfer edilen ısı miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.23)$$

Q Isı transfer miktarı, (W)

$\dot{m}$ Debi, (kg/s)

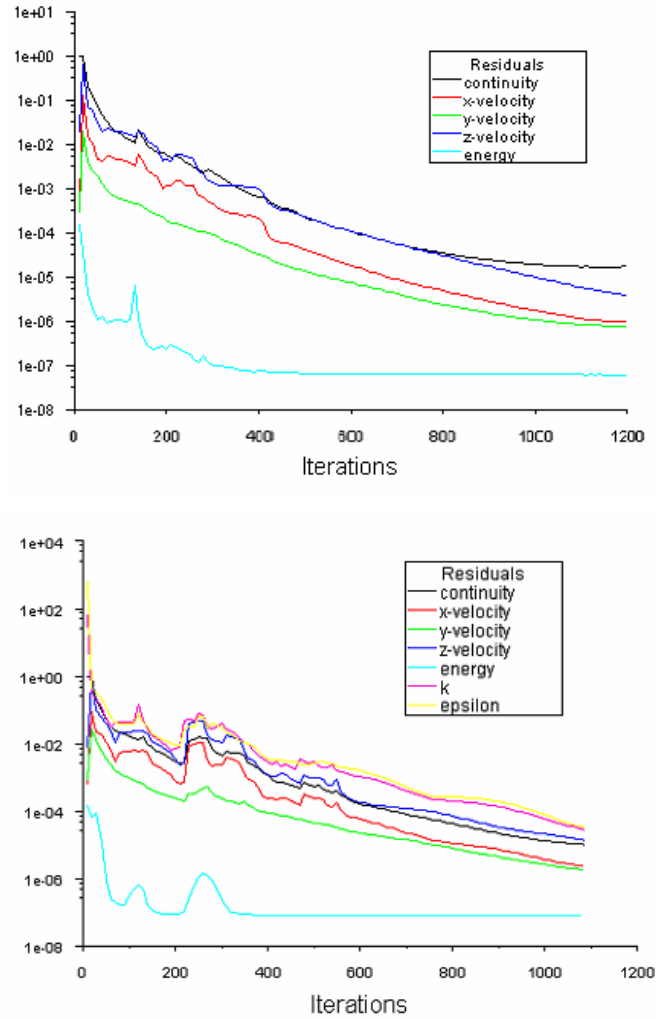
ΔT Sıcaklık farkı, (°C)

4.3.3. Zamana Bağlı Çözüm

30 metre derinliğindeki sondaj kuyusu ve TKIP sistemi yardımı ile karı/buzu eritmek için zamana bağlı olarak bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Gambit programında üç boyutlu çizim ve sınır şartları belirlenmiş; köprü ve yer bloğu modellerinin Fluent 6.2 programı ile zamana bağlı (Unsteady) olarak çözümü araştırılmıştır.

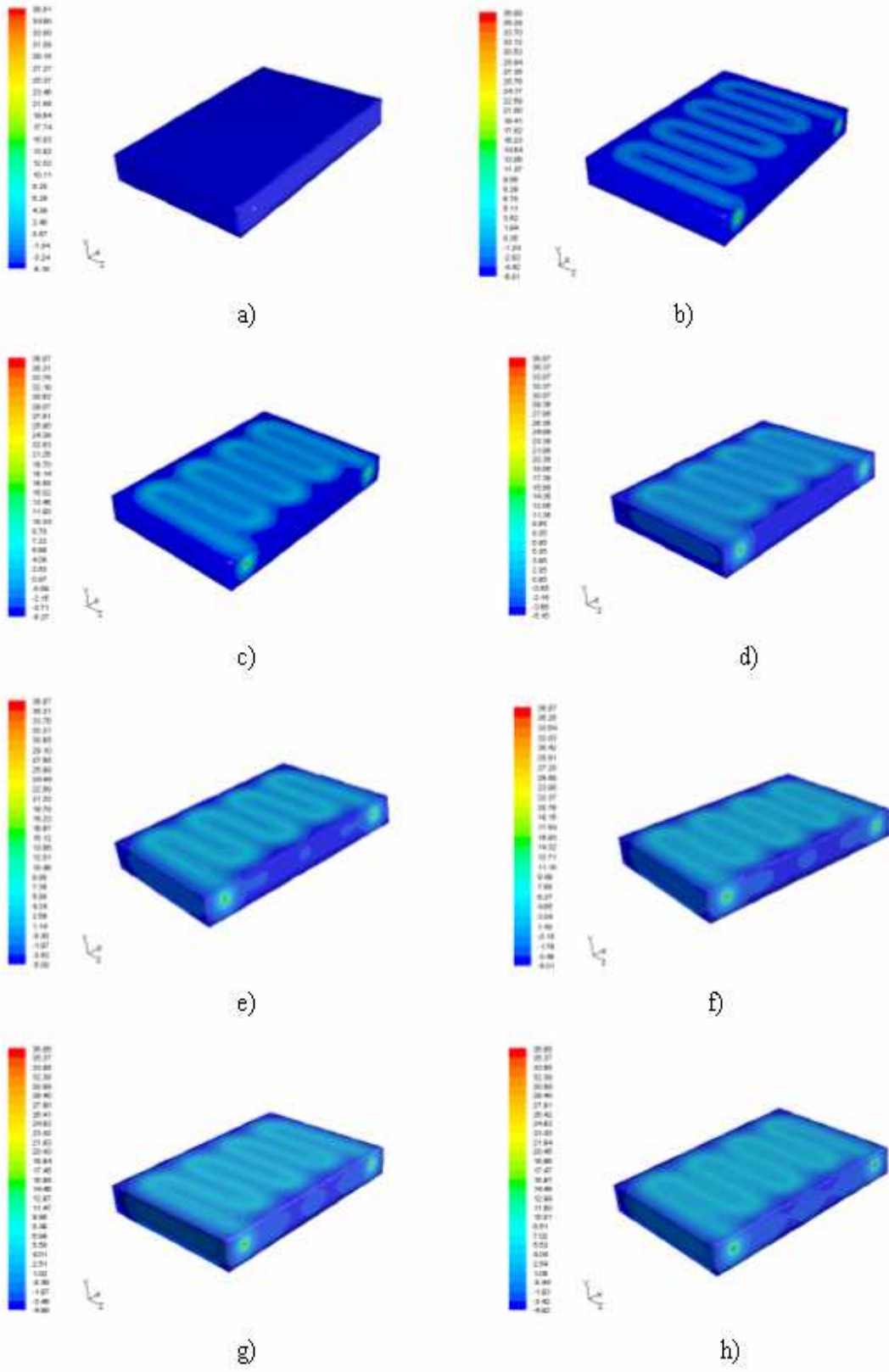
Program, “Solve” menüsü altındaki “Initialize” seçeneği ile hazır konuma getirilerek “Iterate” seçeneği ile Fluent programı çalıştırılmıştır. Iterate menüsünde “Time Step Size(s)” seçeneği 0.1 olarak alınmıştır. Time step seçeneği, ne kadar düşük değerlerde alınır ise o kadar hassas bir çözüm yapılmasını sağlar. Ancak bu seçenek için küçük değerlerin girilmesi çözüm

süresini arttırmaktadır. Çözümün geçmişi ile ilgili grafik Şekil 4.14’de verilmiştir. Her bir çözüm iterasyonunun sonunda değişkenlerin her birinin rezidüel (Residual) toplamı hesaplanarak data dosyası tarafından hafızaya alınır ve böylece çözümün geçmişi kayıt altına alınmış olur. Rezidüel penceresindeki değerler (x, y, z yönlerindeki hızın k ve ϵ parametrelerinden birinin) bir önceki ve sonraki değer arasındaki farkın azaldığı ve sonucun bir çözüme ulaştığını göstermiştir.

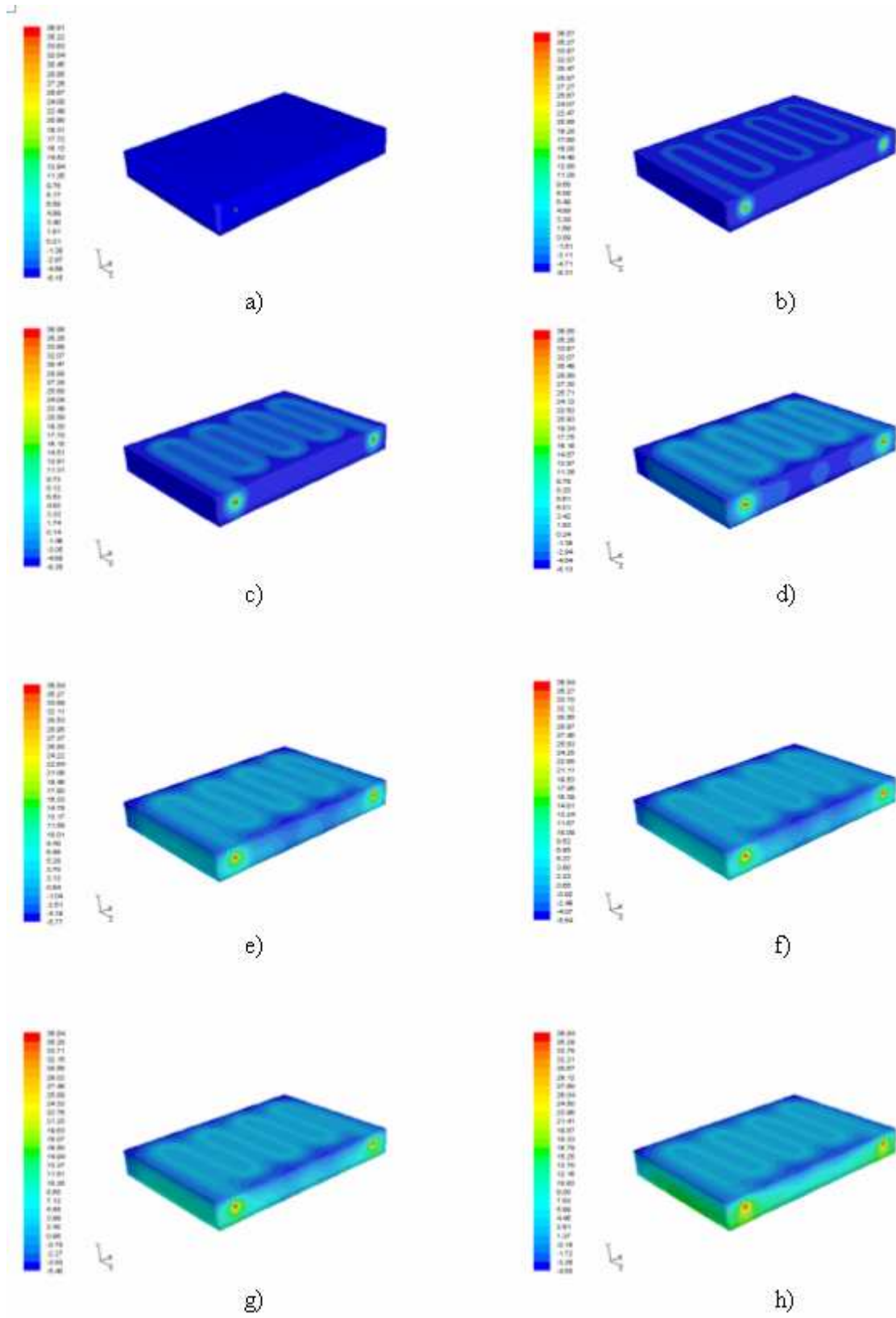


Şekil 4.14 Çözüm esnasında rezidüellerin değişimi

Fluent programı her 20. dakikada durdurularak; köprü ve yer modelinden antifriz+su çözeltisinin çıkış sıcaklığı, köprü ve yer modelinin üst yüzeyinin ortalama sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4.15’de köprü bloğunda Şekil 4.16’da yer bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı (Countours) zamana bağlı olarak sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.15 Köprü bloğunda zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 0 s b) 3600 s c) 7200 s
d) 10800 s e) 14400 s f) 18000 s g) 21600 s h) 25200 s



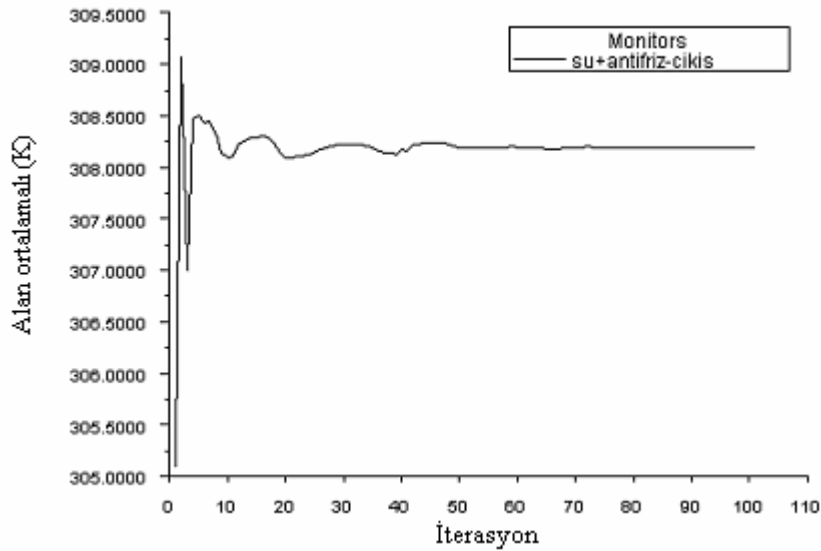
Şekil 4.16 Yer bloğunda zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 0 s b) 3600 s c) 7200 s
d) 10800 s e) 14400 s f) 18000 s g) 21600 s h) 25200 s

30 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemin yardımı ile zamana bağlı olarak köprü bloğuna ve yer bloğuna etkisinin araştırılmasına ek olarak zamana bağlı olmayan çözümleri de yapılmıştır. İkisi arasında bloktaki sıcaklık dağılımının oluşmasında belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Ancak zamana bağlı çözümün uzun zaman alması (her bir bloğun çözümü için 10 gün gece gündüz Core 2 Due işlemciye sahip bilgisayar ile) yorucu bir çalıştırma gerektirmektedir.

4.3.4. Zamana Bağlı Olmayan Çözümler

4.3.4.1. 30 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

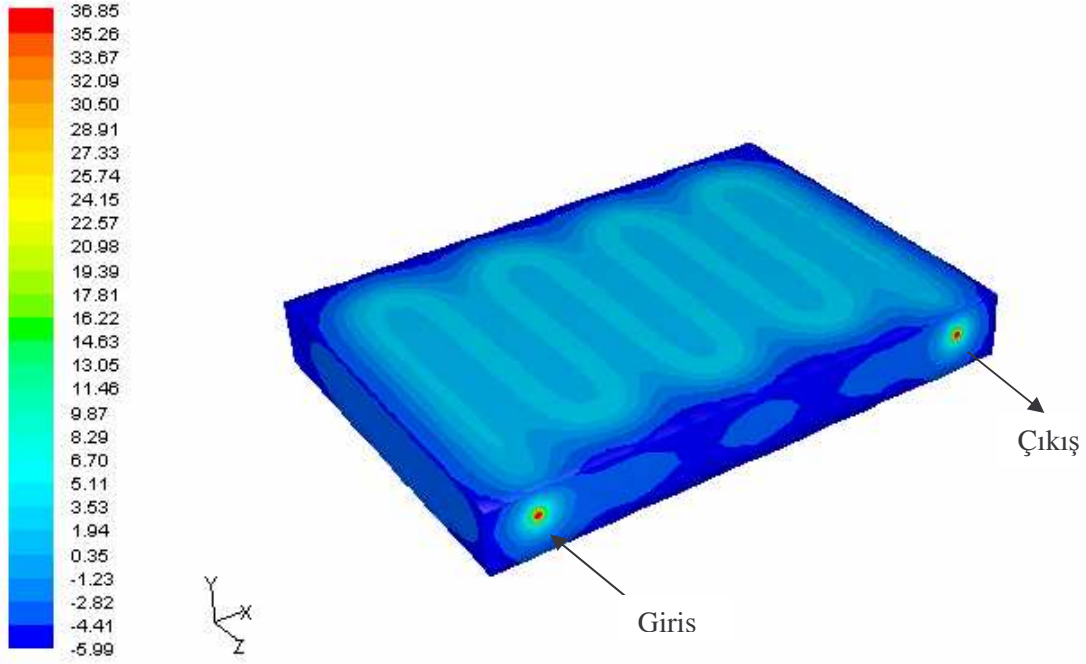
30 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile köprü bloğuna zamandan bağımsız olarak etkisi araştırılmıştır. Köprü bloğuna ortalama 35.97 °C (309.12 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 35.04 °C (308.19 K) ile köprü bloğunu terk etmektedir. Köprüye su+antifriz çözeltisinin giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ortalama fark 0.93 °C olduğu görülmüştür. Çözüm esnasında su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklığının değişimi Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17 Köprü bloğundan su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığının değişimi (30 metre)

Karla kaplı köprü bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.18’de verilmiştir. Bloğun alt ve üst yüzeylerindeki taşınım ısı transferi değeri rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanmıştır.

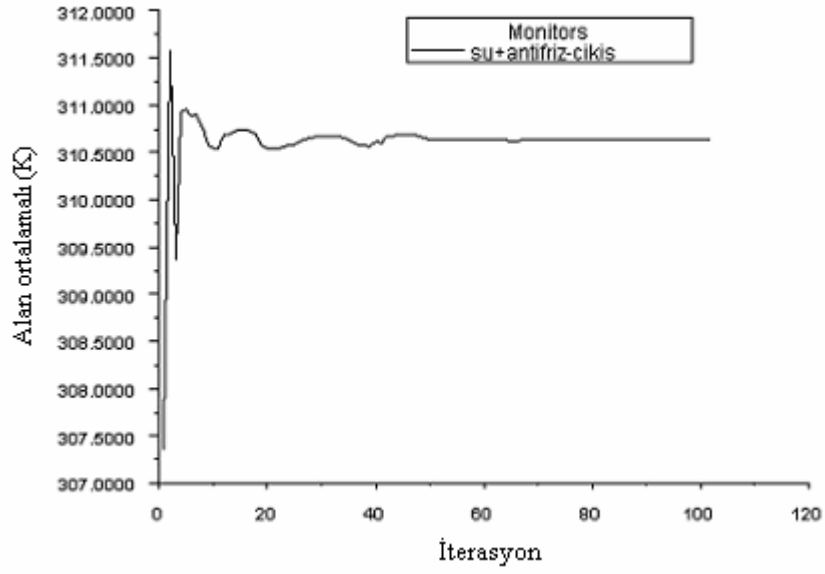
Hesaplanan taşınım ısı transfer katsayısı $28.22 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 'dir. Boruların geçtiği kısımlardaki ısı transferi, su+antifriz çözeltisi sıcaklığının azalması ile girişten çıkışa doğru azalmaktadır. Blok yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri $0.38 \text{ }^\circ\text{C}$ (273.53 K) iken blok altındaki ortalama sıcaklık değeri $-0.31 \text{ }^\circ\text{C}$ (272.04 K) olarak tespit edilmiştir. Bu değerler programın "Report" menüsü altındaki "Surface Integrals" menüsünden elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (30 metre)

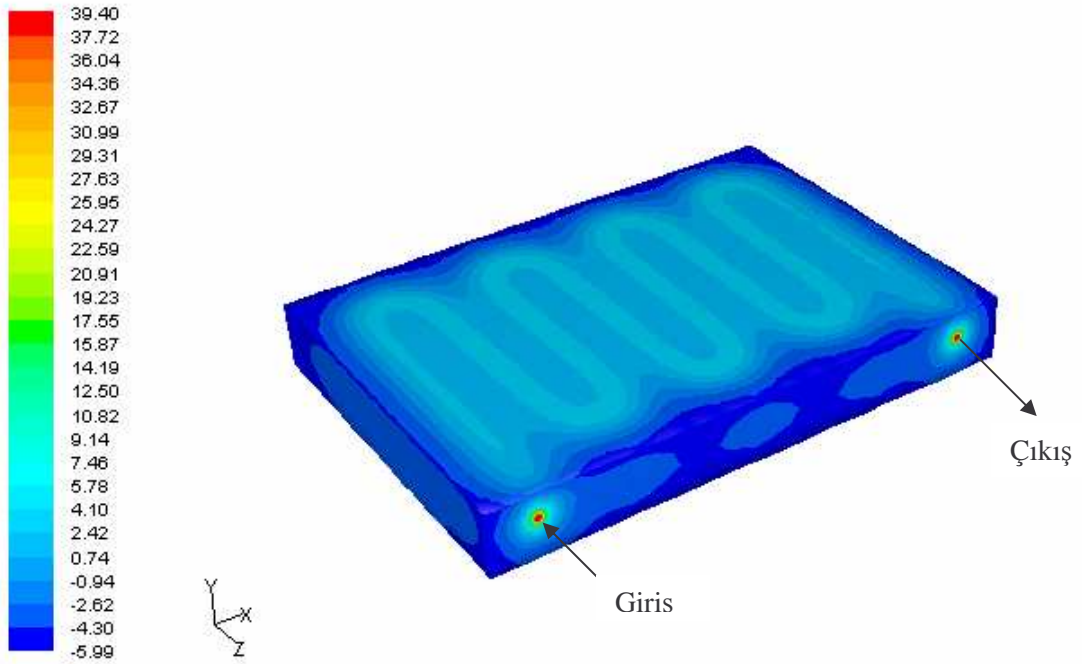
4.3.4.2. 60 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

60 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile köprü bloğuna etkisi araştırılmıştır. Köprü bloğuna ortalama $38.47 \text{ }^\circ\text{C}$ (311.62 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak $37.49 \text{ }^\circ\text{C}$ (310.64 K) ile köprü bloğunu terk etmektedir. Su+antifriz çözeltisinin köprü bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.19'da verilmektedir. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı $0.98 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Köprü bloğundan su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (60 metre)

60 metre derinliğindeki sondaj kuyusu ile yapılan uygulamanın karla kaplı köprü bloğunda oluşturduğu sıcaklık dağılımı Şekil 4.20’de verilmiştir. Bloкта ısı transferinin gerçekleştiği, su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında sıcaklık farkının olduğu ve blok yüzeyinde boruların geçtiği noktalardaki sıcaklığın diğer noktalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Köprünün kenar ve sırt kısmındaki oluşan kayıplardan dolayı bu yüzeylerdeki sıcaklık düşük olmuştur. Blok yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri 0.78 °C olarak ölçülmüştür.

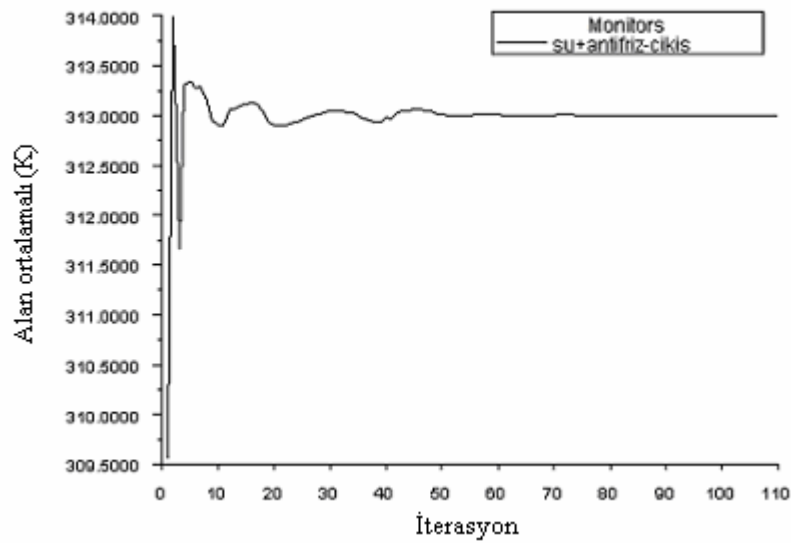


Şekil 4.20 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (60 metre)

4.3.4.3. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

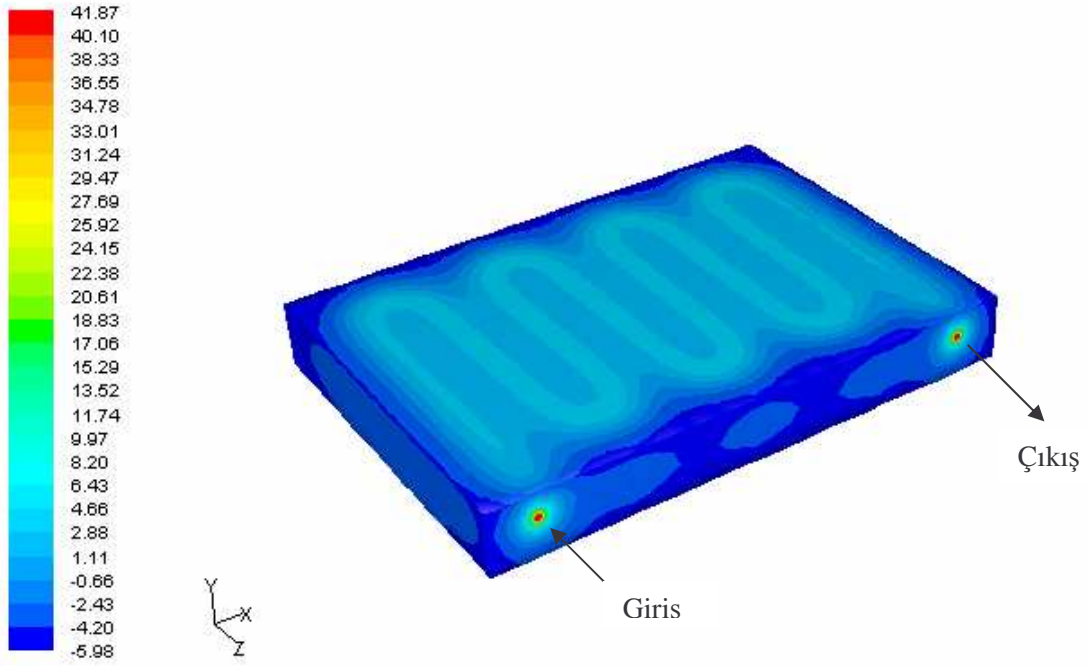
90 metre derinliğindeki sondaj kuyusunun TKIP sistemi ile köprü bloğuna etkisi araştırılmıştır. Köprü bloğuna ortalama 40.9 °C (314.05 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 39.85 °C (313 K) ile köprü bloğunu terk etmektedir. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 1.04 °C olarak hesaplanmıştır.

Programın çözümü sırasında elde edilen su+antifriz çözeltisinin köprü bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 Su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (90 metre)

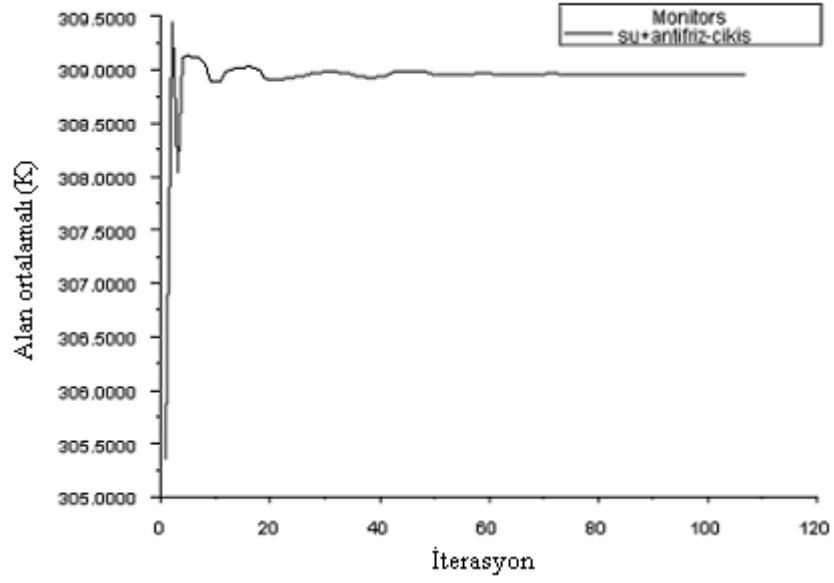
90 metre derinliğindeki sondaj kuyusu için yapılan uygulamada, karla kaplı köprü bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.22’de verilmiştir. Su+antifriz çözeltisi giriş sıcaklığı, 30 ve 60 metre derinliklerdeki sondajlara göre yüksektir. Bu nedenle köprü bloğunda daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. Blok yüzeyi ortalama sıcaklık değeri 1.17 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.22 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı(90 metre)

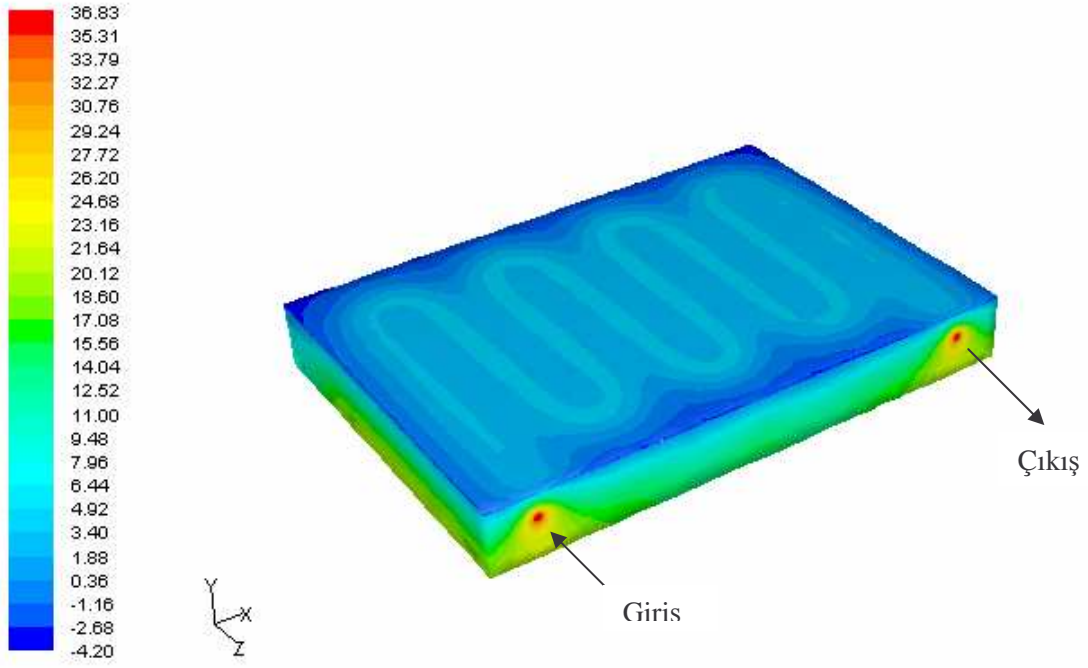
4.3.4.4. 30 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

30 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde yer bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Fluent programı yardımı ile yer bloğu için yapılan çözümlerde, köprü bloğunda olduğu gibi blok altında(sırt kısmında) taşınım ısı transferi oluşmadığından programa blok altı ve kenarları için ısı transfer katsayısı girilmemiştir. Ancak blok üst yüzeyi için köprü bloğunda olduğu gibi taşınım ısı transferi katsayısı tanımlanmıştır. Blok altı ısı transfer katsayısı dışında yer bloğu ve köprü bloğu için Fluent programına girilen aynıdır. Yer bloğuna ortalama 36,48 °C (309.63 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 35.81 °C (308.96 K) ile yer bloğunu terk etmektedir. Yer bloğu yüzeyi ortalama sıcaklık değeri de 2.51 °C (275.66 K) olarak hesaplanmıştır. Su+antifriz çözeltisinin yer bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.23’de verilmiştir. Antifriz+su çözeltisinin yer bloğuna girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 0.67 °C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.23 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı(30 metre)

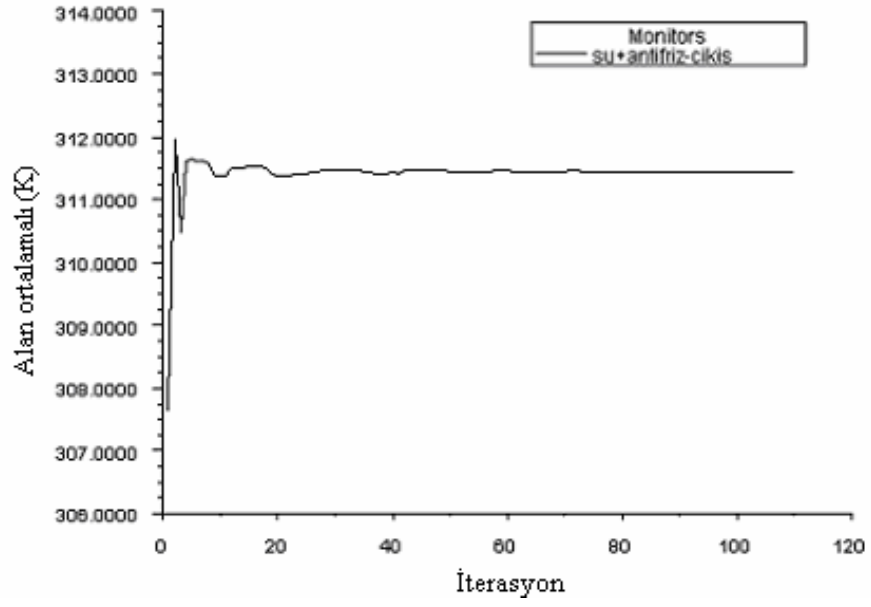
Köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin girişi ve çıkışı arasındaki ortalama sıcaklık farkı 0.93°C iken yer bloğunda bu fark 0.67°C olarak hesaplanmıştır. Yer bloğunun üst yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri 2.51°C (276.06 K) ve alt yüzeydeki sıcaklık değeri 18.46°C (291.61 K) olarak hesaplanmıştır. Karla kaplı yer bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.24’de verilmiştir. Köprü bloğunda yapılan çözümde köprünün sırt kısmında düşük sıcaklıklar olmasına rağmen yer bloğunda bu sıcaklıklar daha yüksektir. Bunun nedeni köprü altında oluşan taşınım ısı transferinin etkisidir. Taşınım ısı transferine bağlı olarak köprü bloğuna su+antifriz sıcaklığının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, yer bloğundan yüksektir.



Şekil 4.24 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı(30 metre)

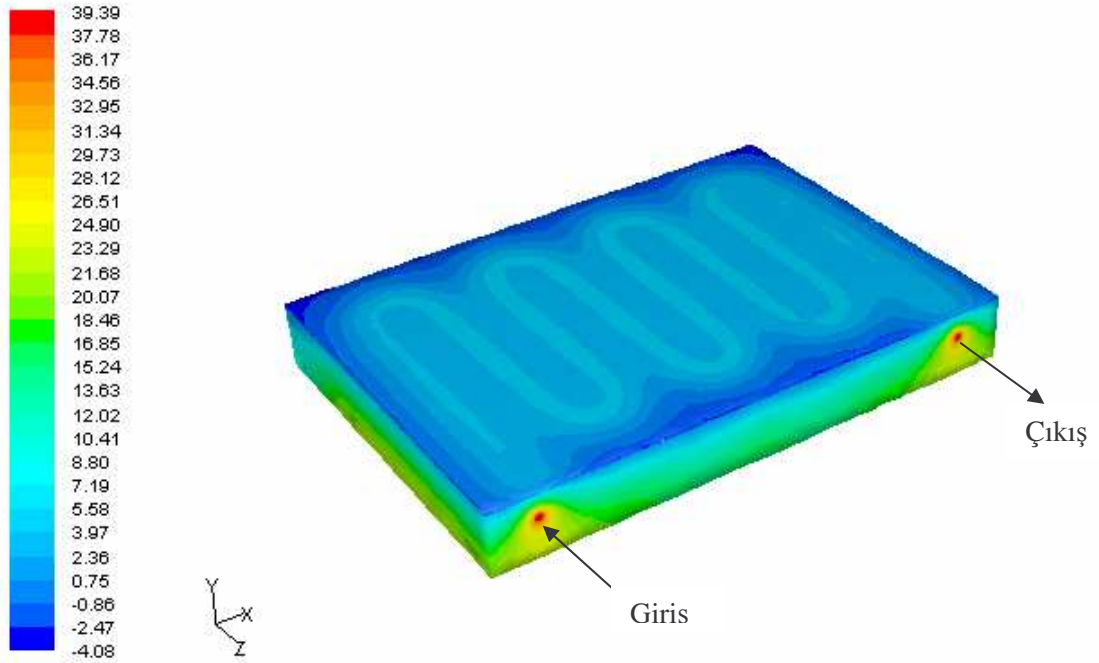
4.3.4.5. 60 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

60 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde yer bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Blok altı taşınım ısı transfer katsayısı dışında 60 metre kuyunun uygulamasında yer bloğu ve köprü bloğu için Fluent programına girilen değerler aynıdır. Yer bloğuna ortalama 39.01 °C (312.16 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 38.3 °C (311.45 K) ile yer bloğunu terk etmektedir. Antifriz+su çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 0.71 °C olarak hesaplanmıştır. Köprü bloğunda bu fark yukarıda bahsedildiği gibi 0.98 °C'dir. Antifriz+su çözeltisinin yer bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı(60 metre)

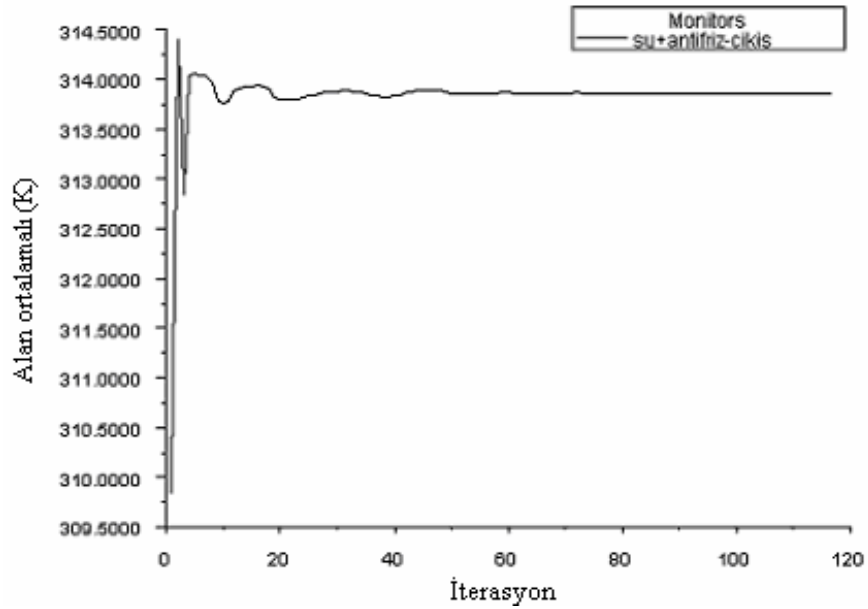
Karla kaplı yer bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.26’da verilmiştir. Yer bloğunun üst yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri 3.04 °C (276.19 K) ve alt yüzeydeki sıcaklık değeri 18.91 °C (292.06 K) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı (60 metre)

4.3.4.6. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

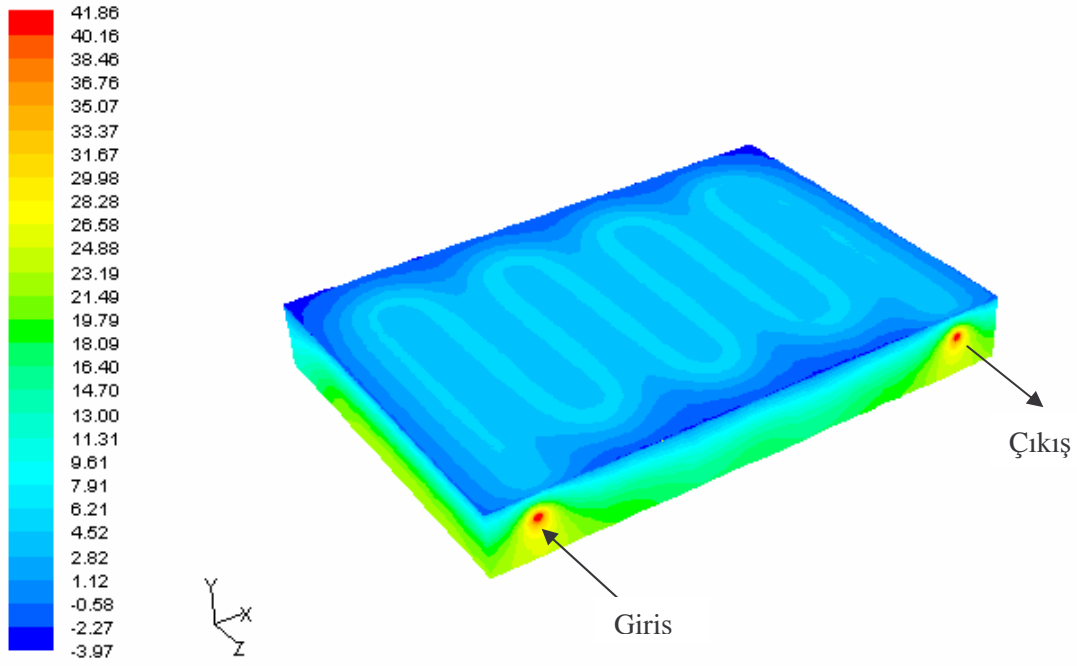
90 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde yer bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Blok altı taşınım ısı transfer katsayısı dışında 90 metre kuyunun uygulamasında yer bloğu ve köprü bloğu için Fluent programına girilen değerler aynıdır. Yer bloğuna ortalama 41.46 °C (314.61 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 40.71 °C (313.86 K) ile yer bloğunu terk etmektedir. Su+antifriz çözeltisinin yer bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.27’de verilmiştir. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 0.75 °C olarak hesaplanmıştır..



Şekil 4.27 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (90 metre)

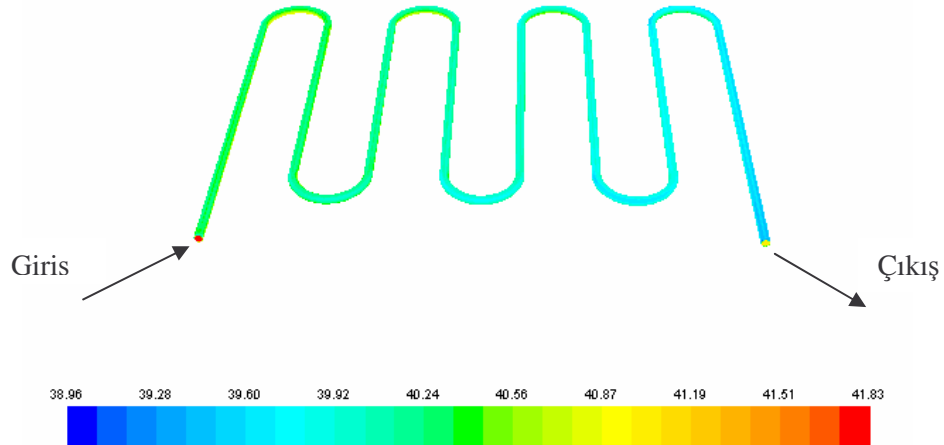
90 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi yardımı ile yer bloğunda ve bloğun üstünde bulunan 1 cm kalınlığındaki kar tabakasında oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Kar tabakasında ve blokta oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 4.28’de verilmiştir. Yer bloğunun üst yüzeyi için hesaplanan ortalama sıcaklık değerinin köprü bloğunun üst yüzeyi için hesaplanan ortalama sıcaklık değerinden 2.39 °C daha yüksek olduğu görülmüştür.

90 metre derinliğindeki kuyudan, 30 ve 60 metre derinliğindeki iki kuyuya göre daha yüksek akışkan sıcaklıkları elde edildiğinden, 90 m ile karın ve buzun yüzeylerden eritilmesi daha kısa sürede gerçekleşir. Ancak kuyu derinliğinin kurulum ve işletim maliyetinin, diğer iki kuyuya göre daha yüksek olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 4.28 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı(90 metre)

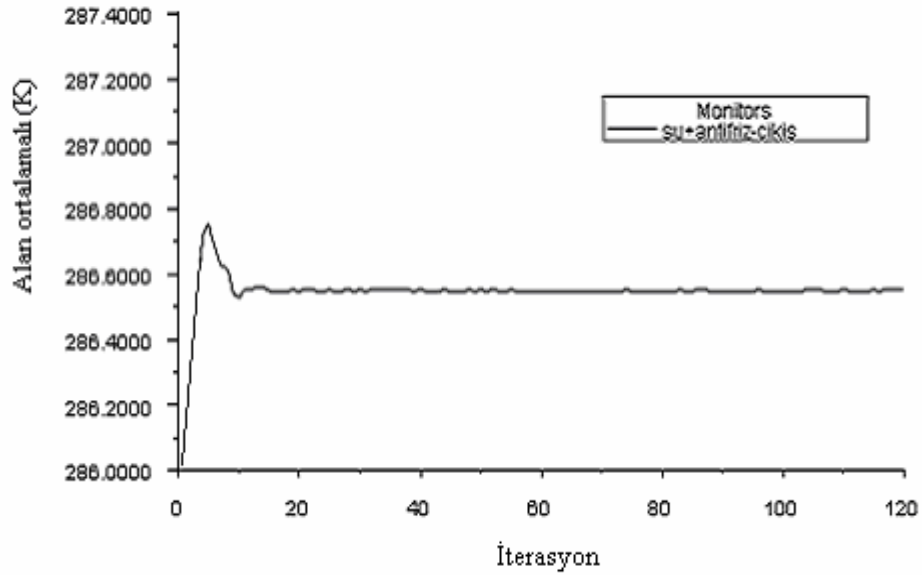
Blok yüzeyinden 7 cm aşağıda serili 16 mm çaplı PX-b borusunun geçtiği noktalarda sıcaklığın daha yüksek olduğu görülmektedir. Yer bloğunun üst yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri 3.56 °C (276.71 K) olarak hesaplanmıştır. Blok içinde serili bulunan 16 mm çaplı PX-b boruda oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 4.29’da verilmiştir. Boruda ısı transferinin gerçekleştiği ve borunun girişinden çıkışına doğru sıcaklığın düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.29 Yer bloğundaki ısıtma borusunda sıcaklık dağılımı

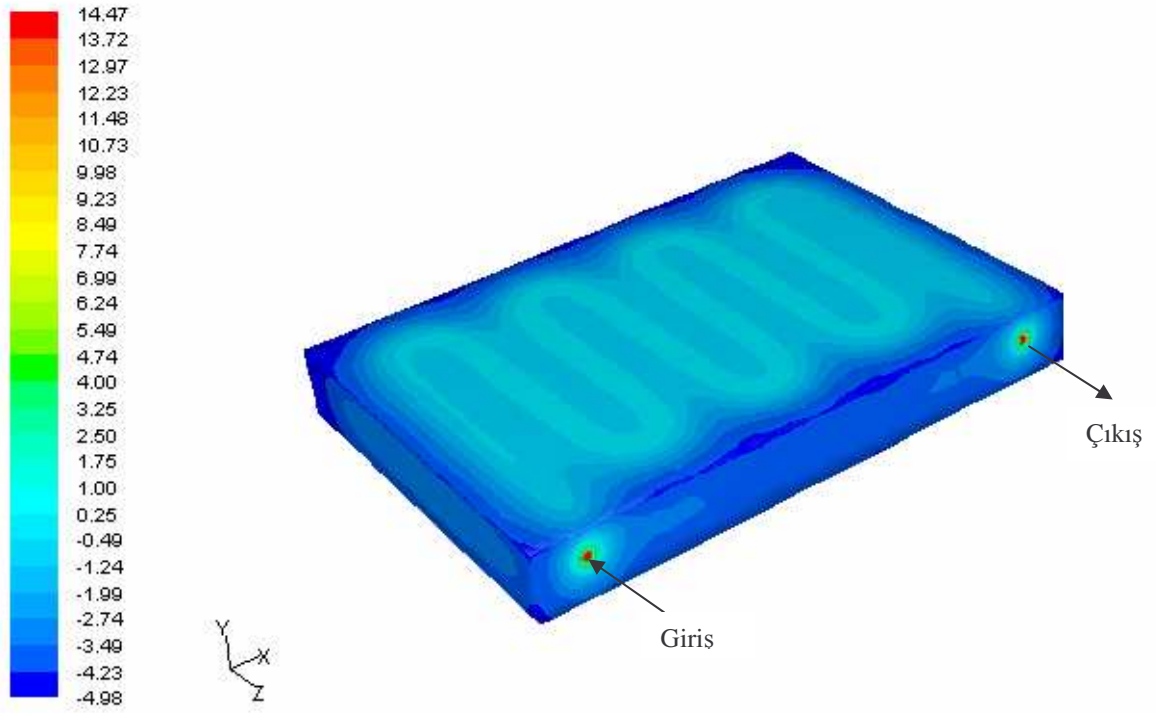
4.3.4.7. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılmaması Halinde Köprü Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

90 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılmaması halinde köprü bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Blok altı ve kenarları için taşınım ısı transfer katsayısı programa giriş verisi olarak tanımlanmıştır. Su+antifriz çözeltisinin köprü bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir. Köprü bloğuna ortalama 13.99°C (287.14 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 13.4°C (286.55 K) ile köprü bloğunu terk etmektedir. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 0.59°C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.30 Su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (TKIP'sız 90 metre)

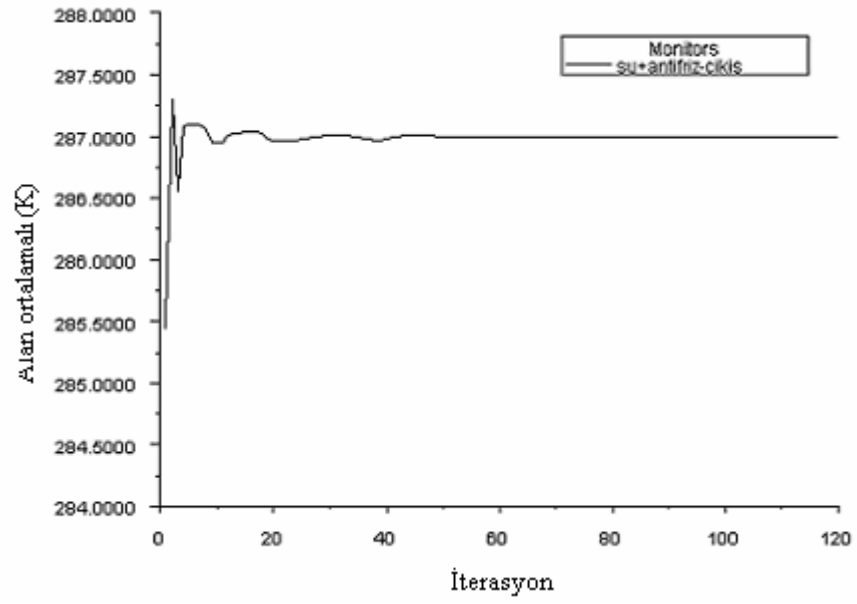
Yüzeyinde 1 cm kalınlığında kar bulunan karla kaplı köprü bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.31'de verilmiştir. Köprü bloğunun üst yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri -1.44°C (271.71 K) ve alt yüzeydeki sıcaklık değeri -2.22°C (270.93 K) olarak hesaplanmıştır. TKIP sistemi kullanmadan köprü bloğu yüzeyindeki karın veya buzun erimesi tamamen gerçekleşmese dahi boruların geçtiği noktalarda çözülme gerçekleşir. Boruların yol boyunca serilmesi yerine enlemesine serilmesi ve serilimin daha az aralıklı yapılması faydalı olur.



Şekil 4.31 Köprü bloğunda sıcaklık dağılımı (TKIP'sız topraktan direkt: 90 metre)

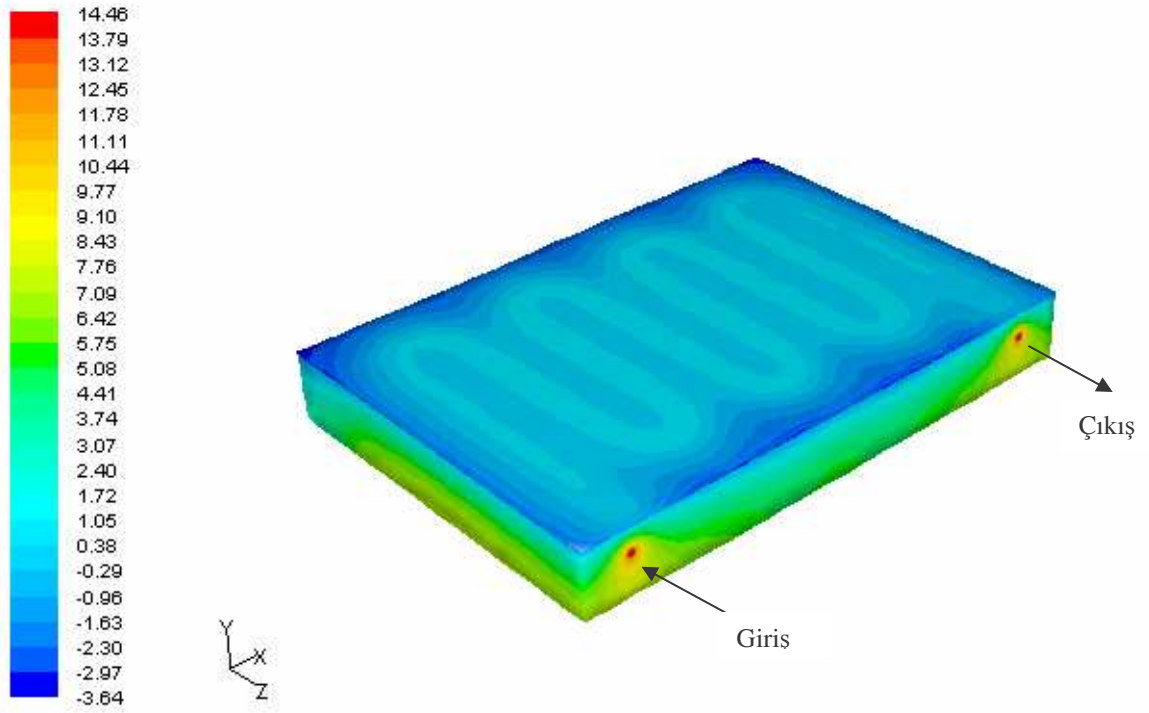
4.3.4.8. 90 m Derinliğindeki Kuyunun TKIP Sistemi ile Kullanılmaması Halinde Yer Bloğunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı

90 metre derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılmaması halinde yer bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Blok altı ve kenarları için taşınım ısı transfer katsayısı programa giriş verisi olarak tanımlanmamış fakat blok yüzeyinde taşınım ısı transfer katsayısı tanımlanmıştır. Diğer veriler yer bloğu için yapılan uygulamalarda kullanılan veriler ile aynıdır. Su+antifriz çözeltisinin yer bloğundan çıkış sıcaklığının grafiği Şekil 4.32'de verilmiştir. Köprü bloğuna ortalama 14.25°C (287.4 K) ile giren su+antifriz çözeltisi ortalama olarak 13.84 °C (286.99 K) ile yer bloğunu terk etmektedir. Su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasında ortalama sıcaklık farkı 0.41 °C olarak hesaplanmıştır.



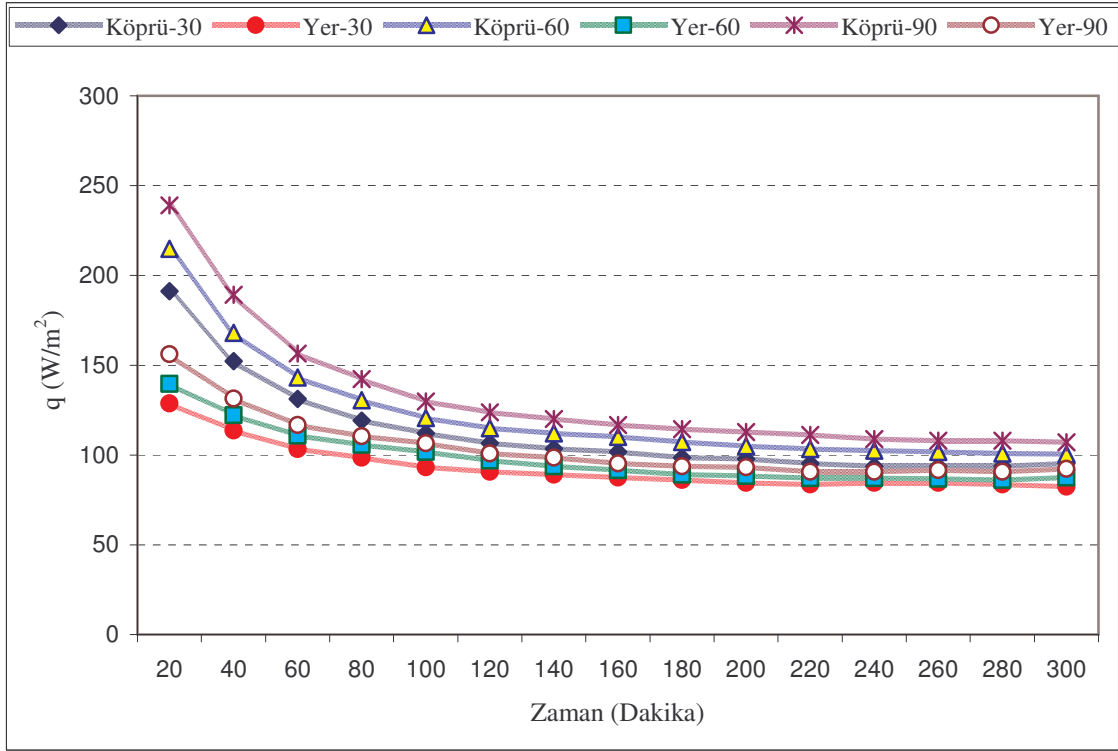
Şekil 4.32 Yer bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama çıkış sıcaklığı (TKIP'sız 90 m)

Yüzeyinde 1 cm kalınlığında kar bulunan karla kaplı yer bloğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.33'de verilmiştir. Yer bloğunun üst yüzeyindeki ortalama sıcaklık değeri 0.04°C (273.19 K) ve alt yüzeydeki sıcaklık değeri 7.33°C (279.48 K) olarak hesaplanmıştır. Yer bloğunun üst yüzeyi için hesaplanan ortalama sıcaklık değerinin köprü bloğunun üst yüzeyi için hesaplanan ortalama sıcaklık değerinden 1.48°C daha yüksek olduğu görülmüştür.



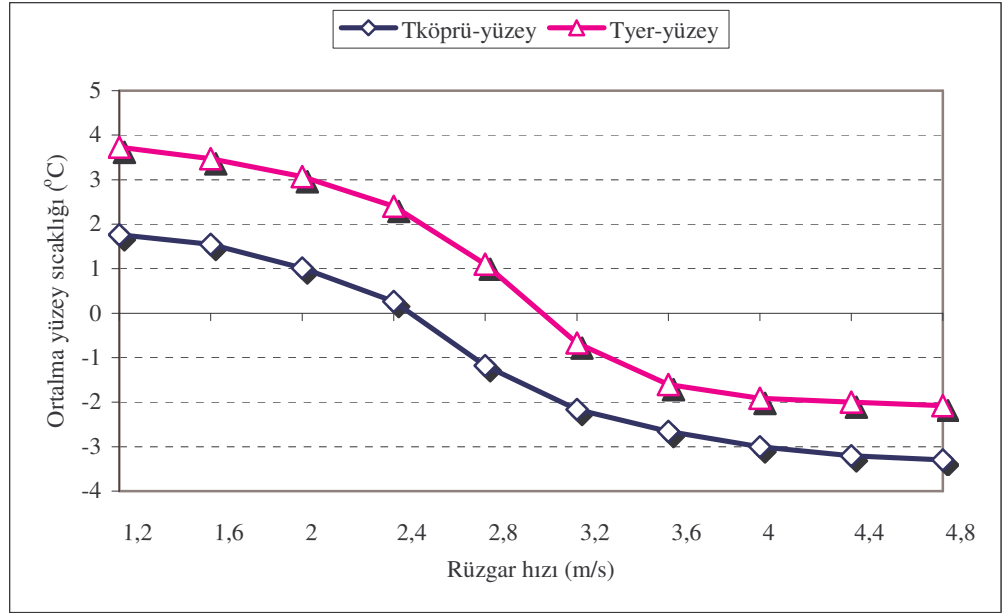
Şekil 4.33 Yer bloğunda sıcaklık dağılımı (TKIP'sız topraktan direkt: 90 metre)

Şekil 4.34'de sayısal analizde elde edilen köprü ve yer bloklarına transfer edilen ısı transfer hızlarının zamanla değişimleri verilmiştir. Isı transfer hızı miktarının hesaplanmasında Eşitlik 4.18 kullanılmıştır. Su+antifriz çözeltisinin debisi köprü bloğu ve yer bloğu için sırasıyla 0.056 lt/s ve 0.067 lt/s ve özgül ısısı Tablo 4.2'den alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Her 20 dakikada su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş ve çıkış sıcaklıkları kaydedilerek ısı transferi hızı hesaplanmıştır. Köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin girişi ile çıkışı arasındaki fark yer bloğuna göre daha yüksektir. Su+antifriz çözeltisinin yer bloğuna göre köprü bloğunda debisi düşük olmasına rağmen köprü bloğundaki ısı transferi hızları yer bloğuna göre fazla olmuştur. Bunun nedeni çözeltinin girişi ile çıkışı arasındaki sıcaklık farkının daha baskın olmasıdır. Su+antifriz çözeltisinin giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın zamanla azalması ısı transfer miktarını düşürmüştür. Şekil 4.34'de görüldüğü gibi köprü modelinde 30, 60, ve 90 m derinliğindeki sistemlerin çalıştırılmasıyla ortalama ısı transfer hızları 112, 122 ve 132 W/m² olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde yer modelinde ise sırasıyla 30, 60 ve 90 m sistemleri için ısı transfer hızları 92, 98 ve 103 W/m² olarak hesaplanmıştır.



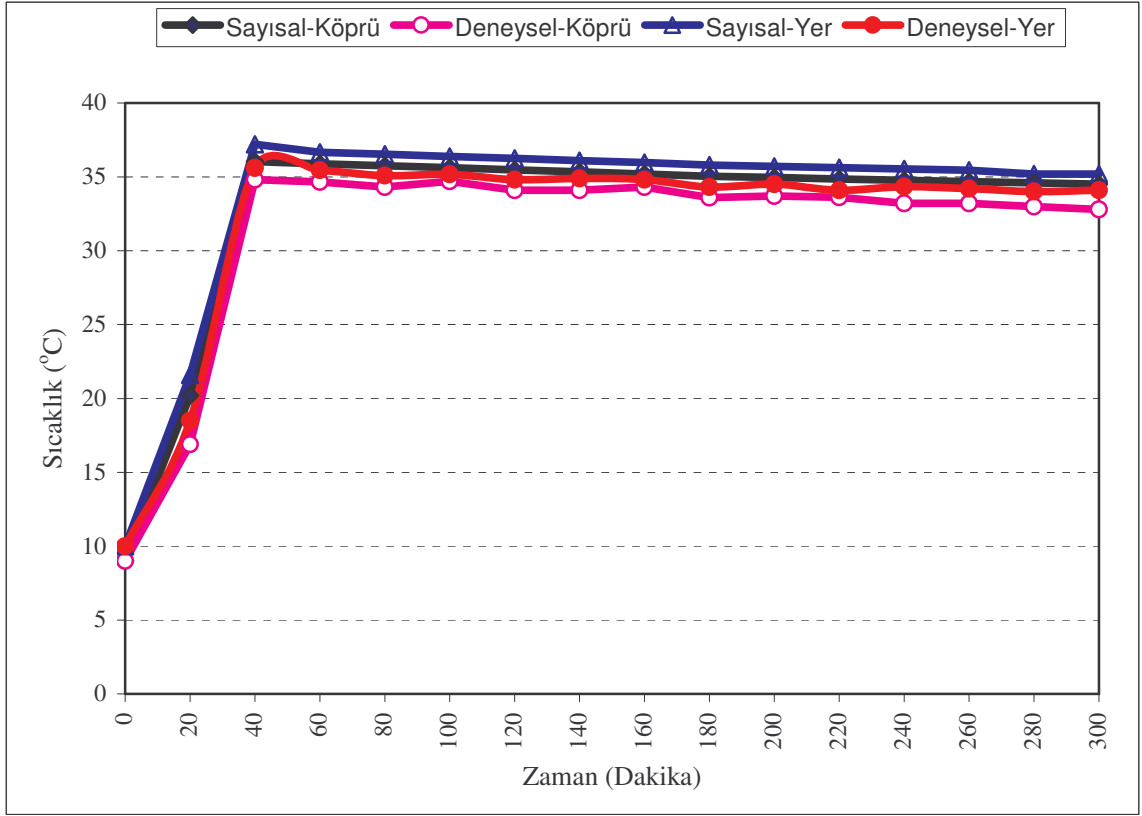
Şekil 4.34 Köprü/yer bloklarında ısı transfer hızları

Şekil 4.35’de 90 m’lik kuyu devrede iken rüzgar hızı ile köprü ve yer modelindeki ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi gösterilmektedir. Çevre sıcaklığının -7 C olduğu kabul edilmiştir. Fırtınalı havalarda köprü ve yer bloklarında karın veya buzun eritilmesi işlemi için fazla enerji gerekirken az rüzgarlı havalarda daha az enerji gerekir. Bu nedenle kar eritme sistemi tasarlanır iken sistemin kurulacağı bölgenin yaklaşık 10 yıllık hava durumu raporlarının ortalaması alınarak enerji kaynağı, blok tasarım parametreleri belirlenmelidir.



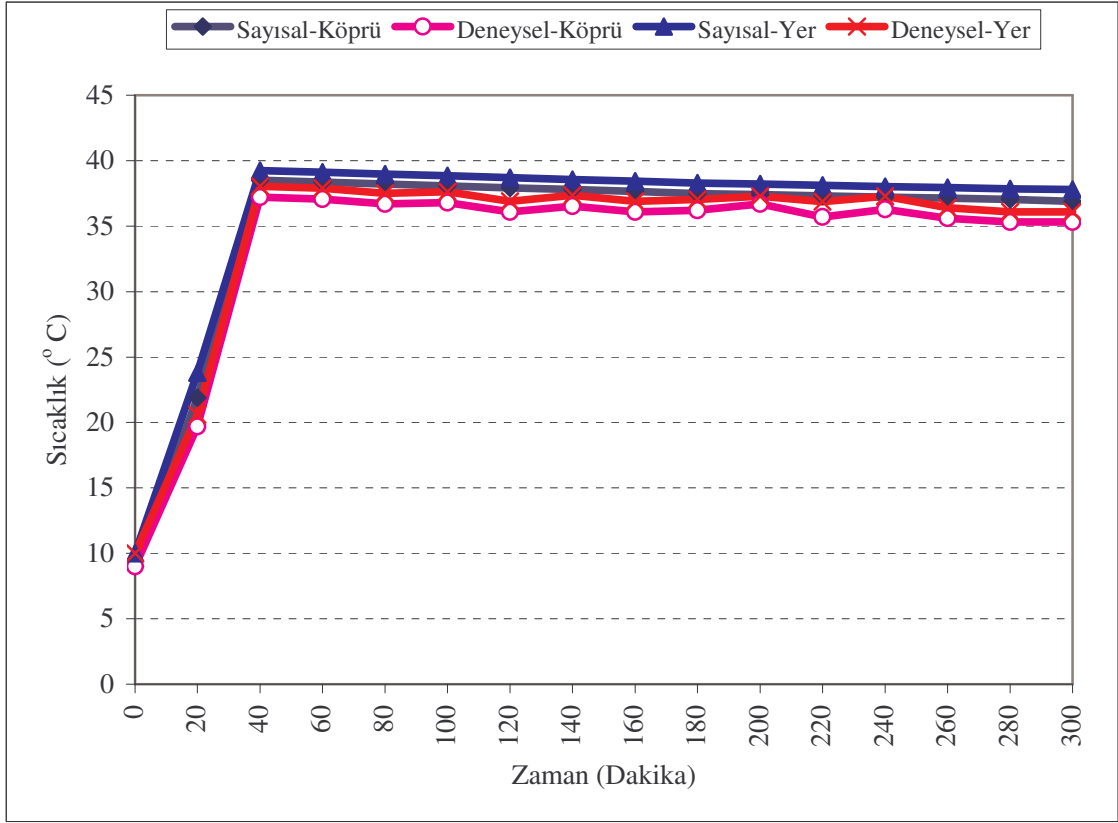
Şekil 4.35 Rüzgar hızı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi

Şekil 4.36’da 30 m’lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen su-antifriz çözeltileri sıcaklıklarının köprü ve yer bloğuna giriş ve çıkış değişimi verilmiştir. 10 °C olan deney başlangıç su+antifriz çözelti sıcaklığının çıkış sıcaklığı sistemin çalışmaya başlaması ile 40 dakikalık bir süre sonra yaklaşık 35 °C’lik bir sıcaklığa yükselmiştir. 40 dakika sonra TKIP sistemi topraktan daha kararlı bir sıcaklıkta ısıyı çekmiştir yani bu süreden sonra TKIP sistemi köprü ve yer sıcaklıklarını arttırmamaya başlamıştır, ama su-antifriz sıcaklığı 30-35 °C sıcaklığı düzeyinde kalmıştır. Bu da 0 °C dolaylarında olan karın veya buzun erimesinin devam edeceğini gösterir. Toplam 300 dakika süren deney sonucunda 30 metredeki toprak sıcaklığı ise 11 °C’e dolayına gerilemiştir. Görüldüğü gibi köprü ve yer bloğunda deneysel ve sayısal çalışma karşılaştırıldığında çok büyük bir değer yakınlığı olduğu görülmüştür. 300 dakika boyunca yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonucunda köprü modelinde su-antifriz sıcaklıklarında % 5.19’lik bir farklılık hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda yer modelinde ise su+antifriz çözeltileri sıcaklıklarında % 3.11’lik bir farklılık hesaplanmıştır.



Şekil 4.36 30 m’lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi

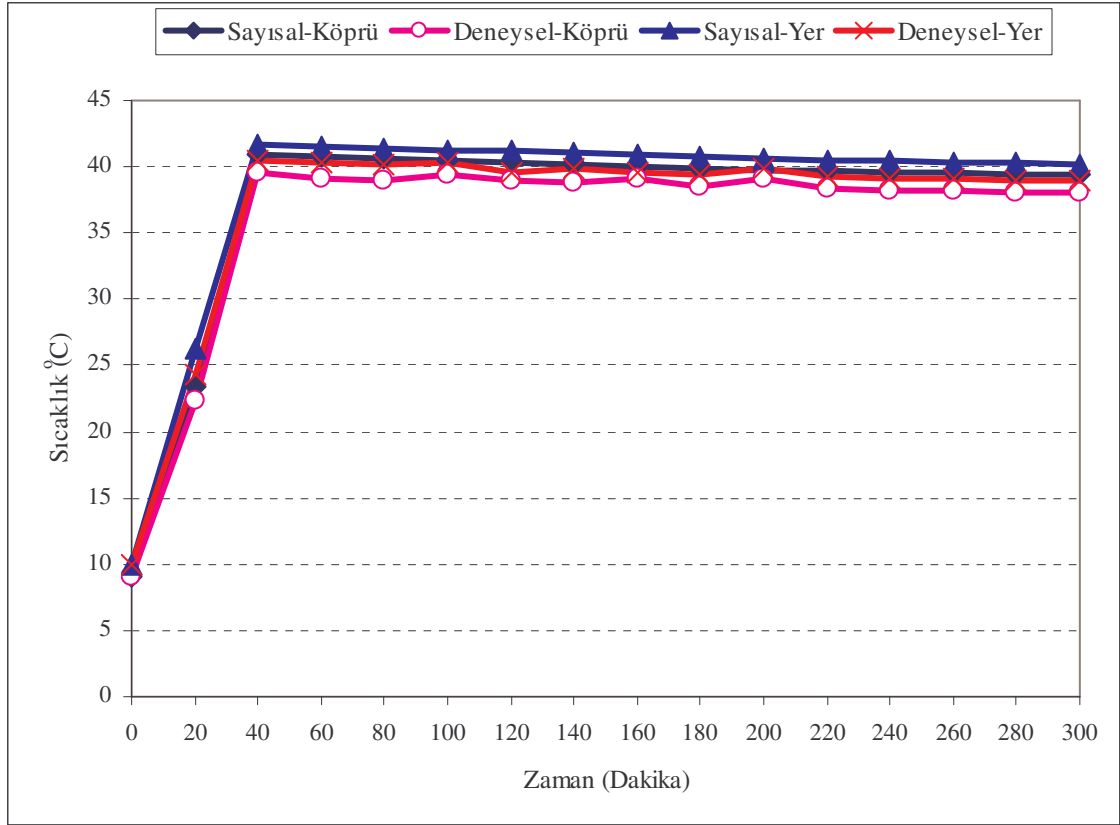
Şekil 4.37’de 60 m’lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Yaklaşık 10 °C olan deney başlangıç su-antifriz çözelti sıcaklığı sistemin çalışmaya başlaması ile 40 dakikalık bir süre sonra yaklaşık 40 °C’lik bir sıcaklığa yükselmiştir. 30 m’lik sondaj kuyusunun su+antifriz sıcaklığını 35 °C’ye getirdiği zamandan daha önce 60 m’lik sondaj kuyusu su+antifriz karışımının sıcaklığını o değere getirmiştir. 40-45 dakika sonra TKIP sistemi topraktan daha kararlı bir sıcaklıkta ısıyı çekmiştir yani bu süreden sonra TKIP sistemi köprü ve yer sıcaklıklarını artırmamaya başlamıştır, ama su+antifriz sıcaklığı 35-40 °C sıcaklığı düzeyinde kalmıştır. Bu da 0 °C dolaylarında olan karın veya buzun erimesinin devam edeceğini gösterir. Toplam 300 dakika süren deney sonucunda 60 metredeki toprak sıcaklığı ise 13.43 °C dolayına gerilemiştir. Görüldüğü gibi köprü ve yer bloğunda deneysel ve sayısal çalışma karşılaştırıldığında çok büyük bir değer yakınlığı olduğu görülmüştür. 300 dakika boyunca yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonucunda köprü modelinde su+antifriz sıcaklıklarında % 5.11’lik bir farklılık hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda yer modelinde ise su-antifriz sıcaklıklarında % 3.06’lik bir farklılık hesaplanmıştır.



Şekil 4.37 60 m’lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi

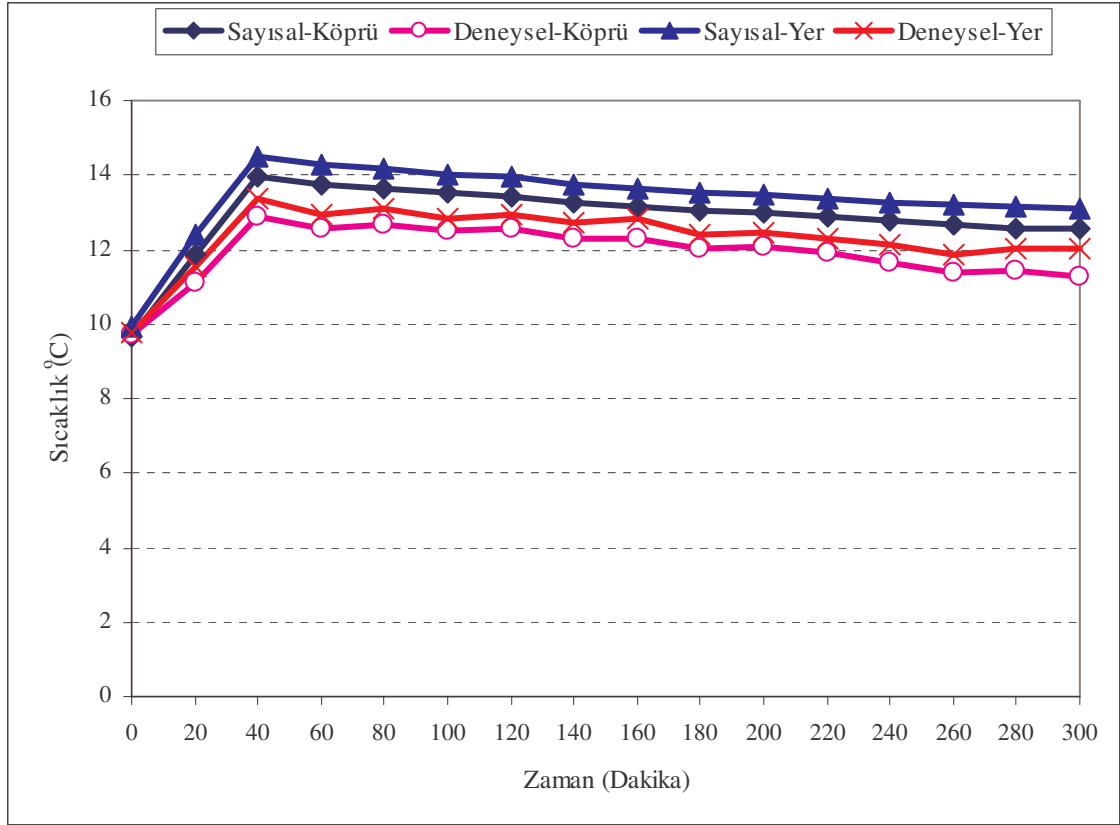
Şekil 4.38’de 90 m’lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen su-antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Yaklaşık 10 °C olan deney başlangıç su-antifriz çözelti sıcaklığı sistemin çalışmaya başlaması ile 40 dakikalık bir süre sonra 42 °C’lik bir sıcaklığa yükselmiştir. 30 ve 60 m’lik sondaj kuyusunun su-antifriz sıcaklığını 35 °C’ye getirdiği zamandan daha önce 90 m’lik sondaj kuyusu su-antifriz karışımının sıcaklığını o değere getirmiştir. 45-50 dakika sonra TKIP sistemi topraktan daha kararlı bir sıcaklıkta ısıyı çekmiştir, yani bu süreden sonra TKIP sistemi köprü ve yer sıcaklıklarını artırmamaya başlamıştır, ama su-antifriz sıcaklığı 35-45 °C sıcaklığı düzeyinde kalmıştır. Bu da 0 °C dolaylarında olan karın veya buzun erimesinin devam edeceğini gösterir. Toplam 300 dakika süren deney sonucunda 90 metredeki toprak sıcaklığı ise 15 °C’e dolayına gerilemiştir. Görüldüğü gibi köprü ve yer bloğunda deneysel ve sayısal çalışma karşılaştırıldığında çok büyük bir değer yakınlığı olduğu görülmüştür. 300 dakika boyunca yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonucunda köprü modelinde su+antifriz sıcaklıklarında

ortalama % 5.07'lik bir farklılık ortaya çıkmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda yer modelinde ise su-antifriz sıcaklıklarında ortalama % 3.02'lik bir farklılık ortaya çıkmıştır.



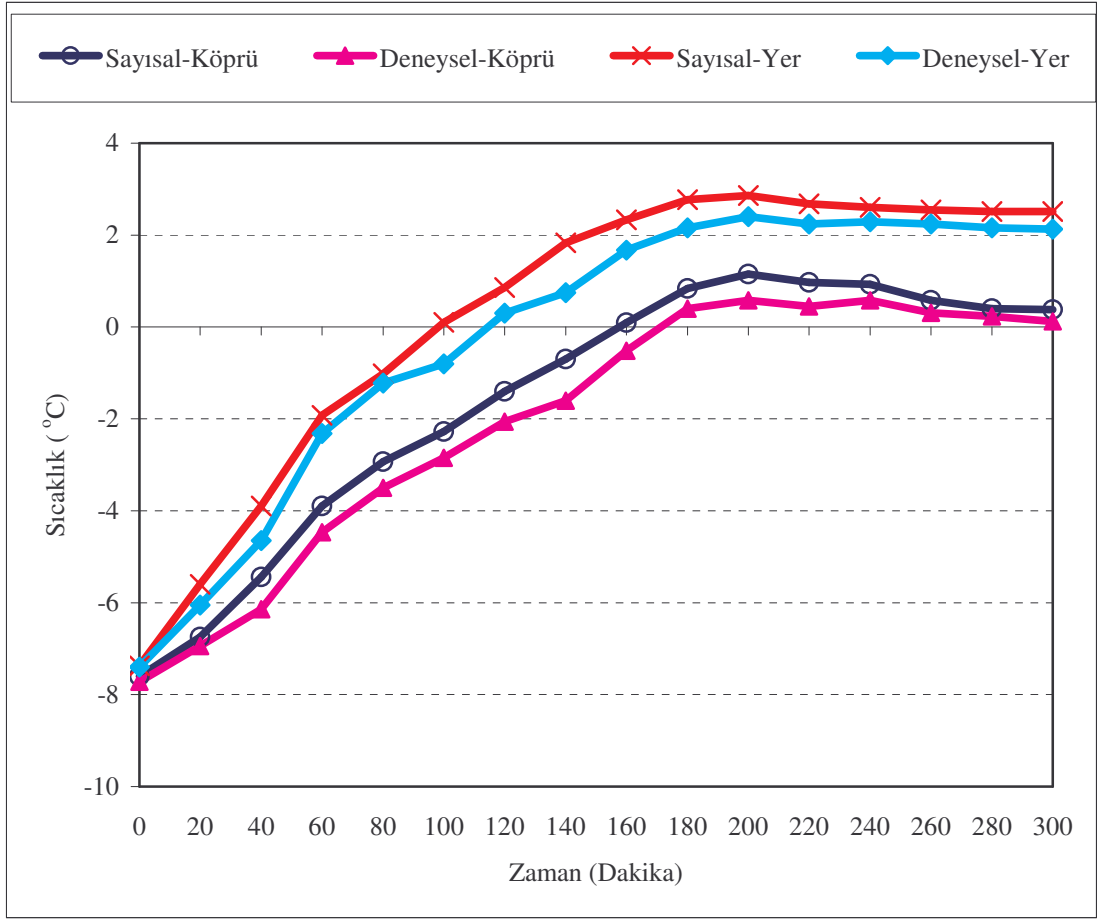
Şekil 4.38 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su-antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi

Şekil 4.39'da 90 m'lik sondaj kuyusu devrede, fakat TKIP devre dışı iken deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen su+antifriz çözeltisinin sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Yaklaşık 10 °C olan deney başlangıç su-antifriz çözelti sıcaklığı sirkülasyon pompalarının çalışmaya başlaması ile 40 dakikalık bir süre sonra yaklaşık 15 °C'lik bir sıcaklığa yükselmiştir. Toplam 300 dakika süren deney sonucunda 90 metredeki toprak sıcaklığı ise 12 °C'e dolayına gerilemiştir. 300 dakika boyunca yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonucunda köprü modelinde su+antifriz sıcaklıklarında % 7.26'lık bir farklılık gözlemlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda yer modelinde ise su-antifriz sıcaklıklarında % 4.22'lik bir farklılık ortaya çıkmıştır. TKIP ile çalıştırılan sistemlerden daha az sıcaklık elde edilmiştir. Elde edilen su+antifriz çözeltisi sıcaklığı köprü yüzeyindeki karı/buzu tam olarak eritemez ise de sürekli olarak topraktan ısı çekecektir. Böylece akışkanın dolaştırıldığı boruların geçtiği noktalarda kar veya buz olayı gerçekleşmeyecektir.



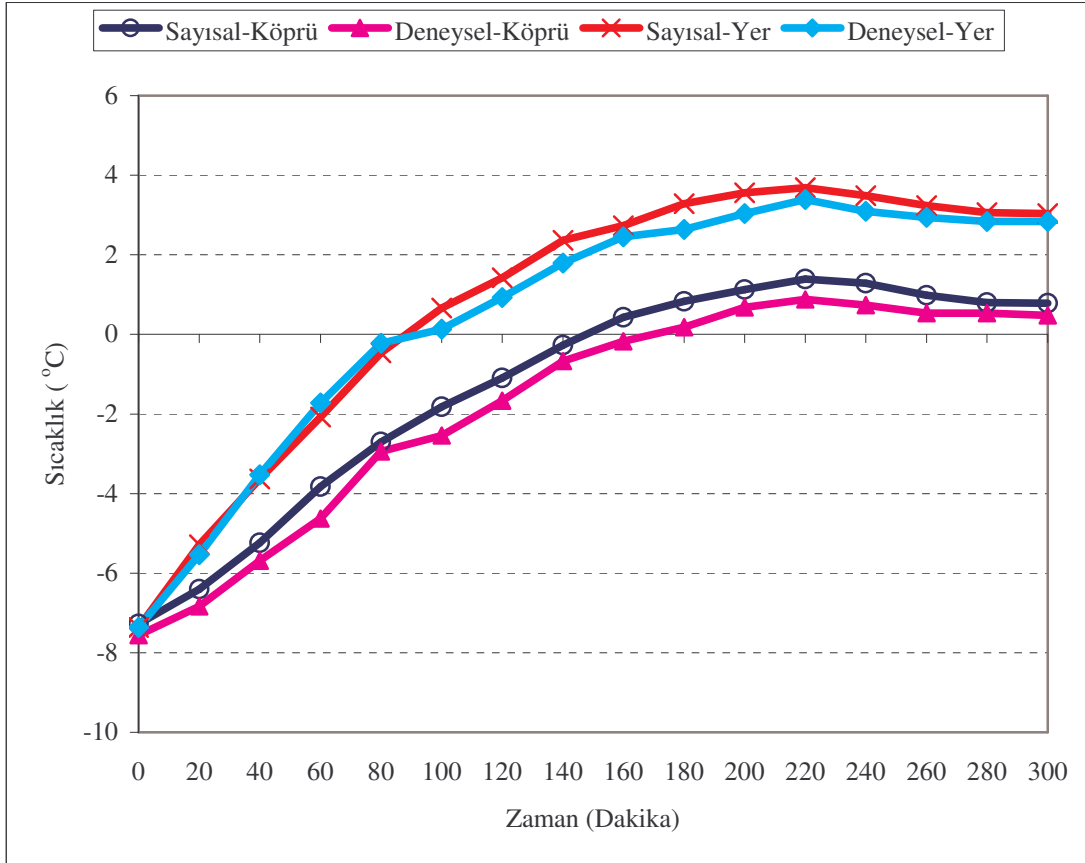
Şekil 4.39 TKIP' sız 90 m'lik sondaj kuyusu devrede iken deneysel ve sayısal çalışma sonucu su+antifriz çözeltisinin çıkış sıcaklıklarının değişimi

Şekil 4.40'da 30 m'lik sistem devrede iken deneysel ve sayısal analizde elde edilen köprü ve yer yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimleri verilmiştir. Deney süresince hava sıcaklığı -8°C ile -7°C arasında değişmiştir. -8°C ile -7°C arasındaki bir köprü/yer başlangıç sıcaklığı 0°C ile 3°C arasına çıkarılmıştır. Köprü/yüzey sıcaklığı test süresinin yaklaşık 180. dakikasında kararlı hale gelmiştir. Test süresince ortalama köprü yüzey sıcaklıkları sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 0.38 ve 0.12°C 'dir. Test süresi sonunda oluşan ortalama yer yüzey sıcaklıkları ise sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 2.51 ve 2.13°C 'dir.



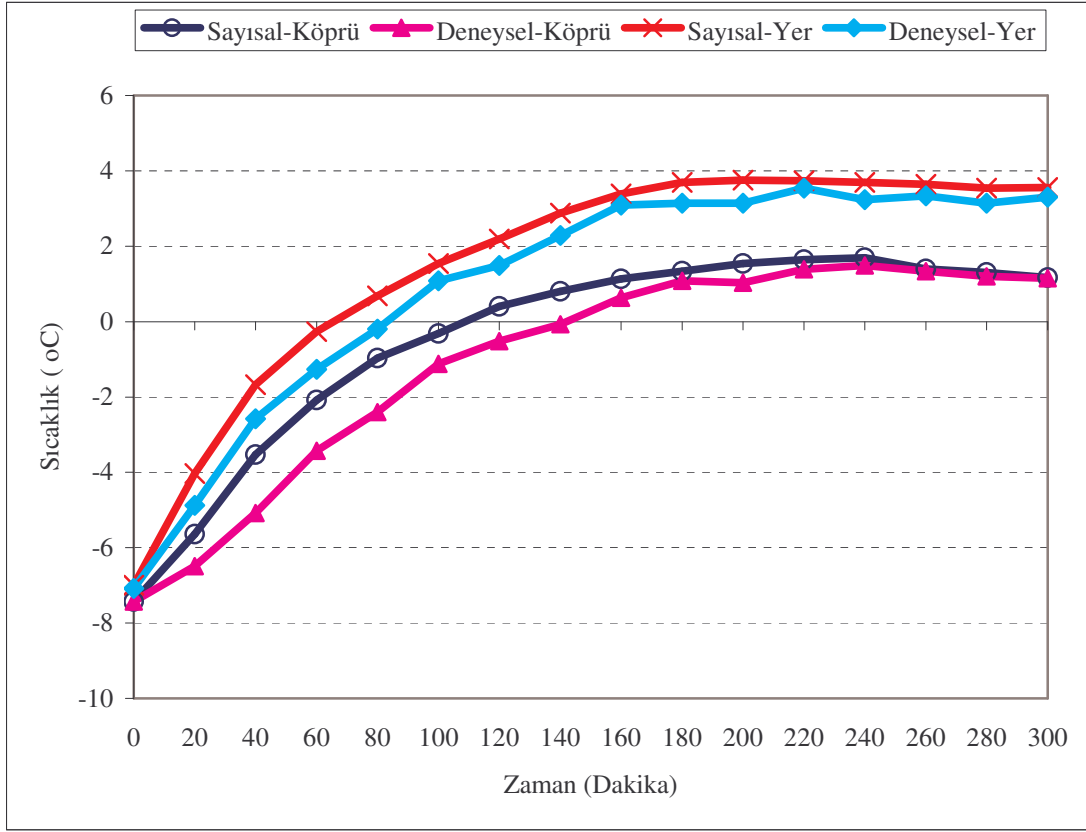
Şekil 4.40 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (30 m)

Şekil 4.41’de 60 m’lik sistem devrede iken deneysel ve sayısal analizde elde edilen köprü ve yer yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimleri verilmiştir. -8 °C ile -6°C arasındaki bir köprü/yer başlangıç sıcaklığı 0 °C ile 4 °C arasına çıkarılmıştır. Köprü yüzey sıcaklığı test süresinin yaklaşık 200. dakikasında kararlı hale gelmiştir. Test süresi sonunda ortalama köprü bloğu yüzey sıcaklıkları sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 0.78 ve 0.52 °C’dır. Test süresi sonunda ortalama yer bloğu yüzey sıcaklıkları ise sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 3.04 ve 2.85 °C’dır.



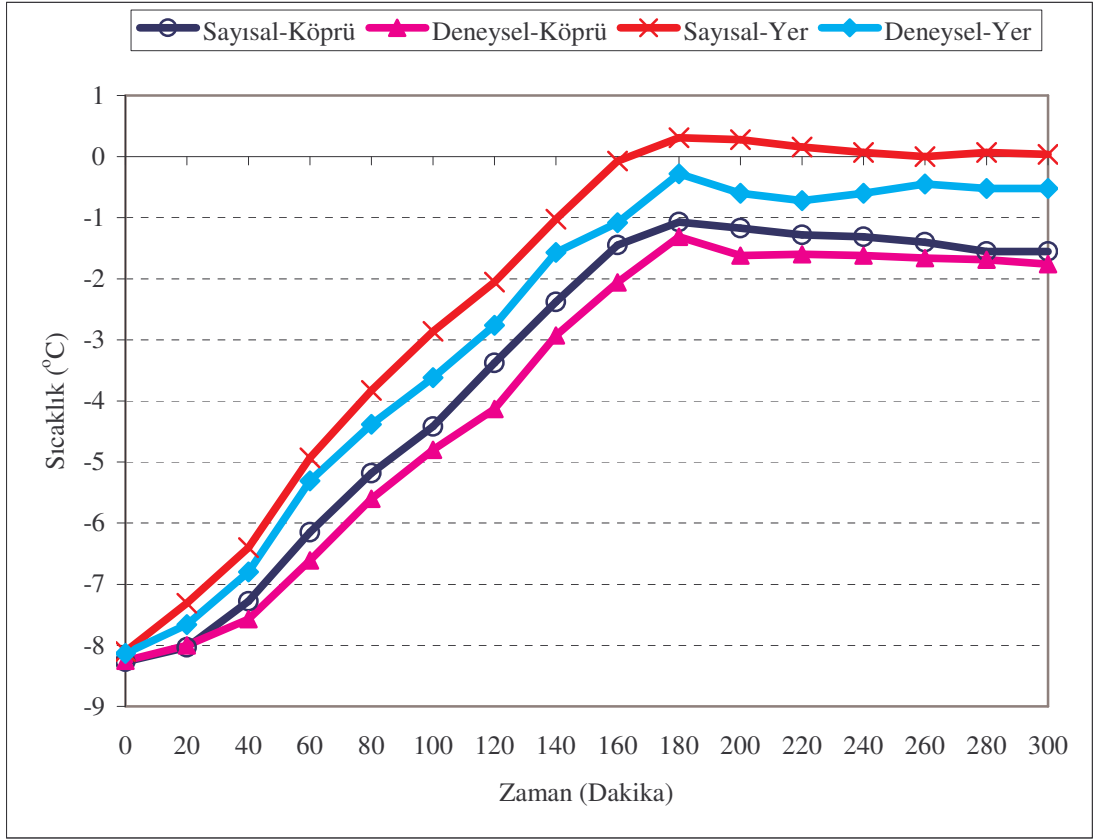
Şekil 4.41 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (60 m)

Şekil 4.42’de 90 m’lik sistem devrede iken deneysel ve sayısal analizde elde edilen köprü ve yer yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimleri verilmiştir. -8°C ile -7°C arasındaki bir köprü/yer ilk sıcaklığı, 1°C ile 4°C arasına çıkarılmıştır. Köprü yüzey sıcaklığı test süresinin yaklaşık 220. dakikasında kararlı hale gelmiştir. Test süresi sonunda ortalama köprü bloğu yüzey sıcaklıkları sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 1.17°C ve 1.15°C ’dir. Test süresi sonunda ortalama yer bloğu yüzey sıcaklıkları ise sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 3.56°C ve 3.30°C ’dir.



Şekil 4.42 Köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak değişimi (90 m)

Şekil 4.43’de 90 m’lik sondaj kuyusu devrede, fakat TKIP devre dışı iken deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen köprü ve yer yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimleri verilmiştir. -8 °C ile -7 °C arasındaki bir köprü/yer ilk sıcaklığı, -2 °C ile 1 °C arasına çıkarılmıştır. Köprü yüzey sıcaklığı test süresinin yaklaşık 180. dakikasında kararlı hale gelmiştir. Test süresi sonunda ortalama köprü bloğu yüzey sıcaklıkları sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla -1.44 ve -1.75 °C’dir. Test süresi sonunda ortalama yer bloğu yüzey sıcaklıkları ise sayısal ve deneysel çalışma için sırasıyla 0.04 ve -0.5 °C’dir. Köprü bloğunda boruların geçtiği noktalar dışında karın veya buzun erimesi gerçekleşmemesine rağmen yer bloğunun yüzey ortalama sıcaklığı 0 °C’nin üzerinde olduğundan kar veya buz erimektedir.



Şekil 4.43 90 metre kuyu devrede iken köprü/yer modeli yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak TKIP'sız değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Düşey tip TID'lerin tasarımında toprak kaya yapısıyla ilgili ısı özelliklerinin bilinmesi kritik önemdedir. Yapılan çalışmada, 60 ve 90 m derinlikteki sondaj deliklerinin ısı iletim katsayısı 1.70 W/mK ve olarak bulunmuştur.
- Kurulan sistemde kar ve buz eritmek için gerekli toplam ısı yükü $Ar=1.0$ için 440 W/m², $Ar=0.5$ için 344 W/m² ve $Ar=0$ için 250 W/m² olarak hesaplanmıştır.
- 60 m'lik kuyuda dolgu bölgesinin ısı direnci 0.05 K/(W/m) ve 90 m'lik kuyuda ise 0.03 olarak K/(W/m) olarak bulunmuştur.
- Toprak sıcaklığı yaklaşık olarak 30 m'de 18 °C, 60 m'de 20 °C ve 90 m'de 23 °C olarak ölçülmüştür.
- Sistemin şebekeden çektiği toplam güç yaklaşık 1400 W ve sistemin çektiği toplam akım ise 7 A olarak ölçülmüştür.
- TKIP sisteminde 30, 60 ve 90 m'de sırasıyla ortalama COP'ları 1.99, 2.66 ve 3.05 olarak hesaplanmıştır. Her 30 metre'de COP değerinde yaklaşık % 20'lik bir artış görülmektedir.
- 30 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde sayısal çalışmada köprü modelinde su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 0.93 °C; yer modelinde 0.67 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü modelinde 0.38 °C; yer modelinde 2.51 °C olarak hesaplanmıştır.
- 30 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde deneysel çalışmada köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 2.75 °C; yer bloğunda 1.79 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda 0.12 °C; yer bloğunda 2.13 °C olarak ölçülmüştür.
- 60 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde sayısal çalışmada köprü modelinde su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 0.98 °C; yer bloğunda 0.71 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü modelinde 0.78 °C; yer modelinde 3.04 °C olarak hesaplanmıştır.
- 60 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde deneysel çalışmada köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 2.9 °C; yer bloğunda 1.89 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda 0.52 °C; yer bloğunda 2.85 °C olarak ölçülmüştür.
- 90 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde sayısal çalışmada köprü modelinde su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 1.04 °C; yer modelinde 0.75 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda 1.17 °C; yer bloğunda 3.56 °C olarak hesaplanmıştır.

- 90 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılması halinde deneysel çalışmada köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 3.08 °C; yer bloğunda 2.98 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda 1.15 °C; yer bloğunda 3.30 °C olarak ölçülmüştür.
- 90 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılmaması halinde sayısal çalışmada köprü modelinde su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 0.59 °C; yer modelinde 0.41 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda -1.44 °C; yer bloğunda 0.04 °C olarak hesaplanmıştır.
- 90 m derinliğindeki kuyunun TKIP sistemi ile kullanılmaması halinde deneysel çalışmada köprü bloğunda su+antifriz çözeltisinin ortalama giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki fark 2.89 °C; yer bloğunda 1.95 °C ve ortalama yüzey sıcaklıkları ise köprü bloğunda -1.75 °C; yer bloğunda -0.5 °C olarak hesaplanmıştır.
- 30, 60 ve 90 m’lik sondaj ünitelerinin çalıştırılması ile her 30 m’de bir köprü yüzey sıcaklığında yaklaşık 0.4 °C’lik bir iyileşme meydana gelirken yer blok sıcaklığında ise her 30 m’de bir yaklaşık 0.5°C’lik bir iyileşme meydana gelmiştir.

Öneriler:

- TKIP yardımı ile yollardaki kar ya da buzun yollardan kaldırılması en etkili yöntemlerdendir. Ancak TKIP sistemlerinin ilk kurulum maliyetlerinin düşürülmesi gerekir.
- İleriki çalışmalarda, TKIP sistemini kullanılarak yollardaki, köprülerdeki vb. yerlerdeki kar veya buz eritme metotlarının geliştirilmesi için toprak yüzeyine borular serilerek; yaz aylarında havanın güneşli olduğu günlerde bir çevrim sağlanarak ilgili yerlere döşenen boruların içinden ısı taşıyıcı akışkanın ısısının kuyulara kapalı çevrimle verilmesi yapılabilir. Karın veya buzun yüzeyde olduğu kış aylarında depolanmış bu enerji tekrar kullanılabilir.
- Blok yüzeyinde su birikintisi var ve sıcaklık 0 °C’nin altında ise, blok yüzeyindeki su donar. Yüzeydeki su, sistemin kar eridikten hemen sonra kapatılması nedeniyle blok yüzeyinin henüz kurumamasından kaynaklanmaktadır. Kar yağışından sonra sıcaklıklar hızla düştüğünden, sistemin boşa çalıştırılması ile yüzey sıcaklığı en az 0.5 °C de tutularak blok yüzeyindeki suyun donması önlenir. Böylece kar eritme için gerekli başlangıç ısı akısı azaltılır.
- Kar eritme sistemlerinin daha hızlı ve etkili tasarımı için bilgisayar programları ile kontrollü bir şekilde destek sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Blackburn, R. R., Glennon, J. C., Glautz, W. D. and Johns, A. D., 1978, Economic evaluation of ice and frost on bridge decks, National Cooperative Highway Research Program, Report no. 182, Transportation research board.
2. Yehia, S., and Tuan C.Y., 1998, Bridge deck deicing, Transportation Conference Proceedings, 51-57.
3. Esen, H., 2002, Toprak kaynaklı ısı pompası performansına etki eden parametrelerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 83s.
4. Yen, Y., 1981, Review of thermal properties of snow, ice and sea ice, U.S. Army Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 81, 10.
5. Colbeck, S., 1986, Classification of seasonal snow cover crystals, Water Resources, 22, 9, 59-70.
6. Iwamoto K., Nagasaka, S., Hamada, Y., Nakamura, M., Ochifuji, K., Nagano, K., 1998, Prospects of snow melting systems (Sms) using underground thermal energy storage (Utes) in Japan, Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference, Pomona, New Jersey. March 16 – 17
7. Jordan, R. E. Hardy, J. P. Perron, F. E. and D.J. Fisk, 1999, Air permeability and capillary rise as measures of the pore structure in snow, An Experimental and theoretical study, Hydrological processes 17, 1733-1753.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy's_law.
9. Spitler, J.D., and Ramamoorthy, M., 2000, Bridge deck deicing using geothermal heat pump, Proceeding of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference.
10. Liu, X., Rees S. J., and Spitler J. D., 2002, Simulation of a geothermal bridge deck anti-icing system and experimental validation, TRB 82nd Annual Meeting, TRB 2003 Annual Meeting Cd Rom, 1-22.
11. Takashashi, H, ve Uemoto, T., 2004, Update of geothermal heat pump use in Japan, Proceedings of the 6th Asian Geothermal Symposium, 51-56.
12. Liu X., Rees S. J., Spitler J. D., 2006, Modeling snow melting on heated pavement surfaces, Part II: Experimental Validation, Applied Thermal Engineering, Article in pres.
13. Liu X., Rees S. J., Spitler J. D., 2006, Modeling snow melting on heated pavement surfaces, Part I: model development, Article In Press.
14. <http://snobear.colorado.edu/Markw/SnowHydro/Atmosphere/atmos.html>.
15. K. Aoki, M. Hattori, T. Ujiie, 1987, Snow melting by heating from the bottom, Proceedings of the International Symposium on Cold Regions Heat Transfer, University

of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, sponsored by American Society of Mechanical Engineers, 189–194.

16. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kar>].
17. Coleou, C, Xu, K., Lesaffre, B. and Brzoska, J., 1999, Capillary rise in snow, *Hydrological Processes* 13, 1721–1732.
18. Chapman, W.P., 1952, Design of snow melting systems, *National Trade Journals*, 49, 4, 96-102.
19. Chapman, W. P. and Katunich, S., 1956, Heat requirements of snow smelting systems. *ASHRAE Transactions*, 62, 149-153.
20. Kilkis, I.B., 1994, Design of embedded snow-melting systems, *Heat Requirements – An overall assessment and recommendations*, *ASHRAE Transactions*, Part 1, 423-441.
21. Ramsey, J. Hewett, M. J. Kuehn, T. H. and Peterson, S. D., 1999, Updated design guidelines for snow melting systems, *ASHRAE Transactions*, 105, 1, 1055-1065.
22. ASHRAE, 2003, *Handbook of HVAC Applications*, American Society of Heating, Refgeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
23. Liu, X., and Spitler J.D., 2004, Simulation based investigation on the design of hydronic snow melting system, *Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*.
24. Lund, J.W., 2000, Pavement snow melting, *Geo-Heat Center, Quarterly Bulletin*, 21, 2.
25. ASHRAE, 1999, *Handbook of HVAC Applications*, American Society of Heating, Refgeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
26. ASHRAE, 2001, *Handbook of HVAC Applications*, American Society of Heating, Refgeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
27. Julius Atkins, 2005, *Designing snow melting systems*, RP-SNO-0305
28. Xiaobing Liu Jeffrey D. Spitler, 2004, A Simulation tool for the hydronic bridge snow melting system, 12th International Road Weather Conference.
29. Chiasson, A. and Spitler, J.D., 2000. A modeling approach to Design of a ground-source heat pump bridge deck heating system, *Proceedings of the 5th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*. Roanoke, VA. September 5-8, 1-16
30. Özsoy, A., ve Acar, M., 2005, Yer çekimi destekli Bakır-Su ısı borusu için deneysel bir çalışma, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 90, 13-18.
31. Nydahl, J. Pell, K., Lee, R. and Sackos, J., 1984, Evaluation of an earth heated bridge deck, *University of Wyoming, Larime, DTFH61-80-C-00053*.
32. Boyd, T., 2003, New snow melt projects in Klamath falls, *Geo-Heat Center, Quarterly Bulletin*.

33. Esen, H., Balbay, A., ve Esen, M., 2004, Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde toprak ısı değiştiricisi boyunun hesaplanması, Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi, 97, 84-88
34. İnan, C. ve Gürses, A.Ç., 1992, Toprakaltı ısı deposu destekli ısı pompaları.
35. Brinkman, C.P., 1975, Space age technology for deicing hazardous highway locations. public roads, 39, 3, 89-95
36. <http://www.devi.com>
37. http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/yuki1219/yuki_e/2_4_2.html.15.07.2007
38. Frier, J.P. 1964. Design requirements for infrared snow melting systems, Illuminating Engineering, 686
39. [http://www.dogubati.com.tr/ısıtma .asp](http://www.dogubati.com.tr/ısıtma.asp)
40. 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, 1, 235-241
41. Sanner, B., Karytsas, C., Dimitrios, M., and Rybach, L., 2003, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, Geothermics, 32, 579-588.
42. Austin, W.A., 1998, Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties, Master of Science Thesis, Oklahoma State University, USA.
43. 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, 1578-1592.
44. Gehlin, S., 2002, Thermal response test – method development and evaluation, Doctor Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
45. Ping, C., Hongxing, Y., and Zhaohong, F., 2006, Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined borehole, Applied Thermal Engineering, 26, 1169-1175.
46. Eskilson, P., 1987, Thermal analysis of heat extraction borehole, Thesis, Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
47. Witte, H., Van Gelder, G. J. and Spitler, J.D., 2002, In situ measurement of ground thermal conductivity: the Dutch perspective, ASHRAE Transactions, 108, 1, 263-272.
48. Bozdog, S., Turgut, B., Paksoy, H., Dikici, D., Mazman, M., and Evliya, H., 2007, Ground water level influence on thermal response test in Adana, Turkey, International Journal of Energy Research, Article in pres.

49. Turgut, B., 2002, Yeraltında termal enerji depolama tekniklerinde belirleyici koşulların incelenmesi, Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
50. Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl, T., Numerical evaluation of thermal response tests, *Geothermics*, 36, 2, 141-166.
51. 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, 1947-1963.
52. Özbalta, N., 2002, Güneş enerjisi potansiyeli ve uygulamaları, <http://egetek.unimedya.net.tr>.
53. Haff, S., 1998, Propylene refrigeration systems for small and mid-sized supermarkets, reports on Science and Technology, 60.
54. Elazığ ili 2005- 2006 yılları meteorolojik verileri, Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü.
55. Hepbaşlı, A., Akdemir, O. and Hancıoğlu, E., 2003, Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system, *Energy Conversion and Management*, 44, 527-548.
56. Aydın, M.C., 2005, Alttan alışı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 126s
57. <http://web.anova.com.tr>, 14.01.2007
58. <http://fluentusers.com>-Introductory Fluent Notes, Fluent v6.2 Mar 2005
59. Fluent 6.2 User's Guide, 2005, Fluent Inc.
60. Sarkar, S., and Balakrishann, L., 1990, Application of a Reynolds-Stress Turbulance Model to the Compressible Shear Layer, ICASE Report 90, 18, NASA CR 182002.
61. Incropera F. P., and Dewitt D. P., 1996, Introduction to Hat Transfer, Wiley & sons Inc., New York, 802p.

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Elazığ'da doğdu. 1990 yılında Mersin Anamur İlköğretim okulundan, 1994 yılında Elazığ Gazi Anadolu Meslek Lisesinden, 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi bölümünden mezun oldu. 1999-2001 yılları arasında F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2002 yılında Karabük ili Eflani ilçesinde askerlik vazifesini yerine getirdi. 1999 yılından itibaren İstanbul Bahçelievler Erkan Avcı Anadolu Teknik Lisesi'nde ve Elazığ Palu Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi'nde çalıştı. Halen Elazığ Gazi Anadolu Teknik Lisesi, Anadolu Meslek Lisesi, Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesinde görev yapmakta ve F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde doktora eğitimini sürdürmektedir. Evlidir.

Asım BALBAY