

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN SAYISAL OLARAK ISITMA ve SOĞUTMA
SEZONLARI İÇİN İNCELENMESİ**

ÖYKÜ GÜRES

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. HAKAN DEMİR**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN SAYISAL OLARAK ISITMA ve SOĞUTMA
SEZONLARI İÇİN İNCELENMESİ**

Öykü Duman tarafından hazırlanan tez çalışması 26.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Isı Proses Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hakan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hakan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma içerisinde geliştirilen kod Mir Araştırma ve Geliştirme A.ř. tarafından desteklenmiştir.

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nn 0472.STZ.2013-2 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tezde toprak kaynaklı ısı değıştircilerinin İstanbul şartlarında hesaplamalı akışkanlar dinamiğı yöntemi kullanılarak performans hesaplaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada her bir parametrenin performansa etkisi düşünülmüş olup, C kodu hazırlanarak analiz edilmiştir.

Öncelikle çalışmam boyunca yaptığı yardımlar ve yönlendirmelerinden dolayı tez danışmanım sayın Doç. Dr. Hakan Demir'e,

Dr. Zafer Gemici liderliğindeki Mir Araştırma ve Geliştirme AŞ'ye,

Beni proje dahil eden, inanan ve destekleyen sayın Dr. Alihsan Koca'ya,

Yapılan çalışmada en çok emek harcadığım C kodu yazımındaki değerleri katkılarından dolayı sayın Yalçın Öksüz'e, Eser Velişan'a ve ANOVA'ya,

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli annem, babam ve kardeşime,

Çalışmamın her anında yardım eden ve destek olan değerli eşim Ramazan Kadir Duman'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın konuyla ilgilenen meslektaşlarıma yararlı olmasını dilerim.

Nisan, 2016

Öykü DUMAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	
TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR	9
2.1 TKIP Tarihçesi	11
2.2 Toprak Özellikleri	14
2.2.1 Yoğunluk	15
2.2.2 Nem oranı	15
2.2.3 Tanecik Materyali.....	15
2.3 TKIP Elemanları ve Çalışma Prensibi	17
2.3.1 Toprak Isı Değiştiricileri.....	17
2.3.1.1 Açık Çevrimli Toprak Isı Değiştiricileri	17
2.3.1.2 Kapalı Çevrimli Toprak Isı Değiştiricileri	18
2.3.1.2.1 Yatay Tip Isı Değiştiriciler	19
2.3.1.2.2 Dikey Tip Isı Değiştiriciler	21
2.3.1.2.3 Slinky Tip Isı Değiştiriciler	22
2.3.1.3 Doğrudan Genleşmeli Toprak Isı Değiştiricileri.....	23
2.3.2 Isı Pompası	24
2.3.3 Isı Dağıtım Sistemi.....	24
2.3.3.1 Yüzeyden Isıtma ve Serinletme Sistemleri	24
2.3.3.2 Fan-Coil ile Kullanım.....	25

2.3.3.3 Radyatör ile Kullanım	26
2.4 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Avantaj ve Dezavantajları.....	27
BÖLÜM 3	
SAYISAL ÇÖZÜM	30
3.1 Akış ve Isı Transferi Denklemleri.....	30
3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğine Giriş.....	31
3.2.1 Analizin Hedeflerinin Belirlenmesi.....	32
3.2.2 Çözüm Modelinin Oluşturulması	32
3.2.3 Ağ Yapısının Oluşturulması	32
3.2.4 Analiz İçin Fiziksel Tanımlamaların Yapılması	34
3.2.5 Analizin Başlatılması.....	34
3.2.6 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	34
BÖLÜM 4	
TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İÇİN ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	35
4.1 Problemin Tanımı.....	36
4.2 Toprak Sıcaklığının Zamana Ve Derinliğe Bağlı Değişimi	39
4.3 Hava Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi	41
4.4 Üst Yüzeydeki Enerji Dengesi.....	41
4.4.1 Yüzeyden Taşınım ile Olan Duyulur Isı Transferi	42
4.4.2 Yüzeye Gelen Güneş Işınımı	43
4.4.3 Yüzeyden Yayılan Uzun Dalga Işınımı.....	44
4.4.4 Yüzeye Gelen Uzun Dalga Işınımı.....	44
4.4.5 Yüzeyden Evaporasyon ile Gizli Isı Transferi	44
4.5 Su Boyunca Sıcaklık Değişimi	44
4.6 CFD Ortamında Problemin Modellenmesi ve Çözümü	46
4.6.1 Geometri	47
4.6.2 Ağ Yapısı	48
4.6.3 İsimlendirmeler	50
4.6.4 Analiz.....	50
4.6.4.1 Malzemelerin Tanımlanması.....	50
4.6.4.2 Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi.....	50
4.6.4.3 Sınır Koşullarının Girilmesi	51
4.6.5 Optimize Edilecek Şartlar	55
4.7 Sonuçlar	55
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	79

SİMGE LİSTESİ

u	x yönündeki hız
v	y yönündeki hız
z	z yönündeki hız
ρ	Yoğunluk
μ	Viskozite
β	Havanın ısı genleşme katsayısı
P	Basınç
T	Sıcaklık
c_p	Özgül ısı
k	Isı iletim katsayısı
θ_{maks}	Seçili model içerisindeki en büyük iç aç
θ_{min}	Seçili model içerisindeki en küçük iç aç
θ_{ideal}	Seçili model içerisindeki en ideal iç aç
$T_{t,ort}$	Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı
$T_{t,gen}$	Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği
y	Gömme derinliği
t	Periyot başlangıcından itibaren geçen süre
P	Periyot
α	Toprağın ısı yayıcılığı
$T_{h,ort}$	Uzun yıllar ortalama hava sıcaklığı
$T_{h,gen}$	Uzun yıllar hava sıcaklık genliği
G	Toprak ısı akısı
$\dot{Q}_{taşınım}$	Yüzeyden taşınım ile olan duyulur ısı akısı
$\dot{Q}_{güneş}$	Yüzeye gelen güneş ışıınımı ısı akısı
$\dot{Q}_{uzundalga_y}$	Yüzeyden yayılan uzun dalga ışıınımı
$\dot{Q}_{uzundalga_g}$	Yüzeye gelen uzun dalga ışıınımı
$\dot{Q}_{evap}$	Yüzeyden buharlaşma ile olan gizli ısı transferi
ρ_h	Havanın yoğunluğu
c_p	Havanın özgül ısı
D_h	Duyulur ısı değişim katsayısı
ζ	Kararlılık fonksiyonu
T_h	Hava sıcaklığı
$T_{surface}$	Toprak üst yüzeyinin sıcaklığı
κ	Von Karman sabiti

z	Referans yüksekliği
R_i	Richardson sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
b	Yüzeyin yutuculuğu ve aydınlatılmasına bağlı katsayı
S	Toprak üst yüzeyine gelen güneş ışıını
S_{ort}	Yüzeydeki ortalama yıllık güneş enerjisi
S_{gen}	Yıllık güneş ışıınındaki salınımın genliği
φ_1	Faz farkı
GD	Güneşin doğuşu
GB	Güneşin batışı
B	Coğrafi konumun enlemi
L	Coğrafi konumun boylamı
R	Referans boylamı
H	Deniz seviyesinden yükseklik
D	Güneşin eğim açısı
ε	Yüzeyin yayıcılığı
σ	Stefan-Boltzmann sabiti
e_h	Kısmi buhar basıncı
T_m	Ortalama su sıcaklığı
c_v	Sabit hacimdeki özgül ısı
p	Akışkan basıncı
v	Özgöl hacim
h	Ortalama taşınım katsayısı
q	Topraktan çekilen/toprağa atılan ısı
Pr	Prandtl Number
f	Sürtünme katsayısı
A	Yüzey Alanı
Re	Reynold Sayısı
$\dot{m}$	Kütlesel Debi
Nu	Nusselt Sayısı
f	Yüzey örtüsü ve toprak nemine bağlı bir katsayı
r_h	Havanın bağıl nemi

KISALTMA LİSTESİ

COP	Coefficient of Performance
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PE	Polietilen
TKIP	Toprak kaynaklı ısı pompası
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
TÜMAS	Türkiye Meteorolojik Veri Arsiv ve Yönetim Sistemi
UDF	User Defined Function

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 TKIP soğutma(a) ve ısıtma (b) modu [54]	10
Şekil 2.2 Yılın farklı günleri için toprağın derinliğe bağlı sıcaklık değişimi.....	11
Şekil 2.3 Toprak ısıl direncinin nem ve yoğunluk içeriğine göre değişimi [62]	15
Şekil 2.4 Açık Çevrimli Toprak Kaynaklı Isı Değiştiricisi Örneği [63]	18
Şekil 2.5 Yatay Tip Isı Değiştirici Örneği [66]	19
Şekil 2.6 Yatay Tip Isı Değiştirici Örneği [66]	19
Şekil 2.7 İki borulu yatay TKIP sistemi [66]	20
Şekil 2.8 Dört borulu yatay TKIP sistemi [66]	20
Şekil 2.9 Dikey Tip Isı Değiştirici Örneği.....	21
Şekil 2.10 Yatay ve Dikey Tip Isı Değiştirici Uygulaması Örneği	22
Şekil 2.11 Slinky Tip Isı Değiştirici Örneği	22
Şekil 2.12 Slinky Tip Isı Değiştirici Örneği	23
Şekil 2.13 Doğrudan Genleşmeli Toprak Isı Değiştiricileri Örneği	23
Şekil 2.14 Yüzeyden ısıtma sistemi ile kullanım örneği [68].....	25
Şekil 2.15 Fan coil ile kullanım örneği [70]	26
Şekil 2.16 Konvansiyonel sistemler ile kullanım örneği [72]	27
Şekil 3.1 HAD yazılımlarında kullanılan başlıca eleman tipleri	33
Şekil 4.1 Yatay borulu toprak kaynaklı ısı değiştiriciler için genel model.....	35
Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan kontrol hacminin seçimi.....	36
Şekil 4.3 Çalışmada kullanılan çözüm bölgesi	37
Şekil 4.4 Çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı	38
Şekil 4.5 Toprağın farklı derinliklerdeki zamana bağlı sıcaklık değişimi	39
Şekil 4.6 Farklı mevsimlerdeki sıcaklık değişimleri	40
Şekil 4.7 İstanbul için yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişimi	40
Şekil 4.8 Uzun yıllar İstanbul günlük sıcaklık değerleri.....	41
Şekil 4.9 Yüzeydeki enerji dengesi örneği [83]	42
Şekil 4.10 Hesaplar için seçilen kontrol hacmi	45
Şekil 4.11 İki boyutlu çözüm bölgesi	47
Şekil 4.12 İki boyutlu çözüm bölgesinde boru detayı.....	48
Şekil 4.13 Oluşturulan mesh yapısı.....	49
Şekil 4.14 Mesh düzgünlüğü (skewness)	49
Şekil 4.15 Mesh Bağımsızlığı.....	49
Şekil 4.16 Başlangıç koşulu için toprak sıcaklığının derinliğe göre değişimi	51
Şekil 4.17 Custom Field Function olarak toprak sıcaklık denkleminin eklenmesi	51
Şekil 4.18 Eklenen Custom Field Function'ın modele eklenmesi.....	52

Şekil 4.19	Borunun çıkartıldığı kısma ısı akısı olarak UDF verilmesi	53
Şekil 4.20	Toprağın üst kısma ısı akısı olarak UDF'in verilmesi	53
Şekil 4.21	Analiz için yazılmış UDF'in çözüm mantığı	54
Şekil 4.22	Sonuçları karşılaştırmak için alınan çizgi	55
Şekil 4.23	Oluşturulan modelde 1,5mdeki sıcaklık değerleri ve su giriş sıcaklıkları	56
Şekil 4.24	Güneş radyasyonu eklendiğinde toprak sıcaklığındaki değişim	56
Şekil 4.25	İstanbul için yıllık toprak üst sıcaklık değerleri	57
Şekil 4.26	İstanbul için toprak yüzeyine gelen toplam ısı akıları	57
Şekil 4.27	Yıllık topraktan çekilen ve atılan ısı akıları	58
Şekil 4.28	Ocak-Mart ayları arasında su giriş ve çıkış sıcaklıkları	59
Şekil 4.29	Mayıs-Eylül ayları arasında su giriş ve çıkış sıcaklıkları	59
Şekil 4.30	Kasım – Aralık aylarında su giriş ve çıkış sıcaklıkları	60
Şekil 4.31	Borulu ve borusuz modelde 1.5m derinlikteki sıcaklık değerleri	60
Şekil 4.32	Analiz başladıktan sonra farklı saatlerde toprak sıcaklık değişimleri	61
Şekil 4.33	TUMAS verilerine göre belirli aylarda derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri ...	62
Şekil 4.34	TUMAS verileri ve Analitik sonuçlar ile bulunan belirli aylarda derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri	62
Şekil 4.35	1.5m de gömülü modelde farklı boru aralıklarında (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıkları	63
Şekil 4.36	1.5m de gömülü modelde farklı boru aralıklarında su çıkış sıcaklıklarının analiz başladıktan sonra ilk 3 ay için değişimi	64
Şekil 4.37	500mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi	65
Şekil 4.38	150mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde su çıkış sıcaklıklarının analiz başladıktan sonra ilk 3 ay için değişimi	65
Şekil 4.39	2000mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi	66
Şekil 4.40	500mm ve 2000mm boru aralıklı modellerde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi	67
Şekil 5.1	Çizgisel kaynak teorisine göre ısı akısının zamana göre değişimi	68

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Dünya genelinde TKIP kullanımı [60] 13
Çizelge 2.2	Toprak Özelliklerinin Tipik Karakteristik Özellikleri..... 16
Çizelge 2.3	Çeşitli toprak türlerinin ısı karakteristikleri 16
Çizelge 4.1	Akış türünü belirlemek için kullanılan parametreler 46
Çizelge 4.2	Analizde kullanılan parametreler 47
Çizelge 4.3	Analizde için kullanılan toprağın özellikleri 50
Çizelge 4.4	İstanbul için toprak yüzeyine gelen en yüksek ve en düşük ısı akıları 57

TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN SAYISAL OLARAK ISITMA ve SOĞUTMA SEZONLARI İÇİN İNCELENMESİ

Öykü GÜRES

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan DEMİR

Isıtma ve soğutma için kullanılan doğal kaynakların sınırlı olması, bu kaynakların azalmasının çevresel etkisi düşünüldüğünde, insanlar yenilenebilir enerji kaynakları kullanmaya gayret göstermelidir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı enerji tüketimini azaltacaktır. Isı pompasında ısıtma performansı (COP_{HP}) ve soğutma performansı (COP_R) evaporatör ve kondenser sıcaklıklarına bağlıdır. Evaporatör ve kondenser sıcaklıkları ise ısıtılacak/soğutulacak ortam ve ısının alınacağı veya verileceği ortam sıcaklıklarına bağlıdır. Dolayısıyla ısı pompasının performansı doğrudan kaynak/kuyu sıcaklığına bağlıdır. Kaynak sıcaklığı yaz-kış değişim göstermektedir.

Toprak kaynaklı ısı pompalarında gömme derinliğine bağlı olarak bu değişim havadan daha düşüktür. Dolayısı ile toprak kaynaklı ısı pompalarının COP değeri hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksektir. Kaynak ısı değiştiricisindeki ısı geçişinin iyileştirilmesi ile toprak ısı değiştiricisindeki akışkanla toprak arasındaki sıcaklık farkı azaltılabilir.

Toprak yüksek ısı kapasitesi sebebi ile ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Toprak sıcaklığı belirli bir derinlikte sabit kalır, ve bu sıcaklık zaman ve derinliğe bağlı periyodik bir fonksiyondur. Isı pompası sistemleri genelde kesikli çalışan süreksiz sistemlerdir. Kesikli çalışma derecesine göre sürekli çalışan kaynak ısı değiştiricisinin performansına olan etkisi değişecektir. Isı değiştiricisinin ısı depolama özelliği yüksek ($\rho \cdot C_p$) bir ortama gömülmesi performansı olumlu yönde etkileyecektir. Toprak karakteristikleri İstanbul'da ısı değiştirici dizaynı için uygundur. Bu çalışmada, HAD metodu kullanılarak

ısı değiştiricilerin analizi yapılmış olup, mevsim şartları için optimum dizayn koşulları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Numerik analiz, HAD, enerji,

NUMERICAL ANALYSIS FOR ENERGY PERFORMANCE OF GROUND HEAT EXCHANGER UNDER ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF ISTANBUL

Öykü GÜRES

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Adviser: Doç. Dr. Hakan DEMİR

By reason of limited amount of natural resources exploited for heating and cooling, and considering that reduction of environmental impact, people should strive to use renewable energy resources. The use of renewable energy sources decreases the energy consumption. Heat pump heating performance and cooling performance depends on the evaporator and condenser temperatures. The evaporator and condenser temperatures are dependents of heated / cooled environment and ambient temperature. Therefore, performance of the heat pumps dependent of source/sink temperature directly. Source temperature is varies with summer and winter seasons. Considering ground source heat pumps, this variation is much smaller than the air, depending on the burying depth. Therefore, the COP of ground source heat pump is higher than the air source heat pumps. The ground can be used as a heat source and it has high thermal capacity. The temperature of the ground becomes relatively constant with depth and its temperature is a periodic function versus time and depth. Heat Pumps usually work with transient conditions. The effect of ground heat exchanger on thermal performance when they bury in environment which has high thermal storage ($\rho \cdot C_p$) characteristics. Soil characteristics are appropriate for heat exchanger design in Istanbul. In this study, energy performance of the ground source heat exchanger has been evaluated with CFD method according to conditions for Istanbul, Turkey. Furthermore, energy saving potential of new model has been evaluated..

Keywords: Numerical analysis, CFD, energy, environment, climate change, ground heat exchanger, heat pump

1.1 Literatür Özeti

Literatürde toprak kaynaklı ısı değıştirciler ile ilgili birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar ısı transferi modelleri, numerik çözüm yolları, ekonomik karşılaştırmalar gibi birçok konu da yapılmıştır. Bu çalışma da yararlanılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Literatürde topraktaki ısı transferini inceleyen çeşitli makaleler yer almaktadır. Analitik modeller çizgisel kaynak teorisine [1] ya da silindirik kaynak teorisine dayanmaktadır.[2] Yine literatürde uzun yıllardır çalışması yapılan nümerik modeller bulunmaktadır.[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Svec et al. [10] durgun, zamana bağlı ve döngüsel koşullar için numerik model oluşturmuşlardır. Buna göre plastik boru kullanıldığında ısı akışı önemli derecede azalmaktadır.

Mei [11] yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı değıştircisinde sezonsal toprak sıcaklık değışimlerini çalışmak için sonlu farklar metodunu kullanmıştır. Modelini değıştirilmiş çizgisel kaynak ve basit çizgisel kaynak modelleri ile karşılaştırmıştır.

Tarnawski ve Leong [12], yatay döşenmiş toprak ısı değıştircileri için ısı transferi denklemlerini içeren iki boyutlu bir matematik model tanımlamıştır. Oluşturdukları bu model toprakta yer alan nem, donma, erime, kuruma gibi koşulları da içermektedir.

Mihalakakou et al. [13] tarafından yapılan numerik çalışma, ısı ve kütle akışının birlikte olduğunu kabul eden bir nümerik model kullanarak topraktan havaya ısı değıştircilerin

ısı davranışları öngörmeyi amaçlamıştır. Ana denklem, TRNSYS yazılımına benzer bir şekilde (sonlu farklar yöntemi), kontrol hacmi formülasyonu ile ayrıklaştırılmıştır. Numerik metot 1.1 m derinliğe gömülü 14.8 m uzunluğunda ve 0.15 m yarıçapında bir boru kullanılarak deneysel olarak onaylanmıştır. Numerik ve deneysel hava sıcaklıkları karşılaştırılmış ve mükemmel uyum gözlemlenmiştir.

Piechowsky [15] oluşturduğu modelde toprak nemini dikkate alarak kütle transferini eklemiştir.

Lacroix et al. [15], üç boyutlu toprak kaynaklı ısı transferi modeli üzerine çalışmışlardır. Model birden fazla sayıda gömülü borudan oluşabilmektedir, homojen olmayan toprak özellikleri, beton temeli ve yalıtım, zamana bağlı değişken sınır koşulları, yoğunlaşma ve buharlaşma şartlarını da içermektedir. Oluşturulan model, bir serada kurulu sistem üzerinden alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Modelde nem ihmal edilmiştir. Borulardaki ısı transferi eksenel yönde büyük ölçüde taşınım ile olmaktadır. Model sonuçları ayrıca FLOW3D isimli program ile de karşılaştırılmıştır.

Bir başka hesaplamalı yaklaşım Gauthier et al.[16] tarafından topraktan havaya ısı değiştiricilerin seralardaki davranışı ile ilgili sunulmuştur. Korunum denklemleri çözmek için FDM tabanlı kullanan üç boyutlu nümerik model, toprak ve hava arasındaki zamana bağlı ısı değişimini simüle etmek için kullanılmıştır. Diğer sonuçların yanı sıra, borular arası mesafeye ve boru uzunluğuna bağlı olarak günlük depolanan veya geri kazanılan enerji miktarının katlanarak azaldığı görülmüştür.

Krarti et al. [17] ,Puri [18] ve Kumar et al. [19]. MATLAB ile kullanılabilecek sonlu farklar yöntemi ile çözüm yapan nümerik bir model geliştirmişlerdir. Bu model topraktaki sıcaklık gradyanlarını, yüzey koşullarını, nem vb. Faktörleri de içermektedir.

Larsen et. al [20], Arjentin’de bir okulun bahçesinde gömülü boruların yaz mevsimi boyunca termal davranışını inceleyerek enerji tüketimini azaltmayı amaçlamışlardır. Giriş, çıkış ve ortada bulunan iki adet sensör ile hız ve sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Dış hava sıcaklığı ve okuldaki iç sıcaklık izlenmiştir. SimEdit yazılımı ile nümerik analiz yapılmış olup deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Buna göre sistemin varlığı ile binada soğutma yapılabileceği görülmüştür. Kumar et. al [21, 22], iki farklı nümerik

model geliştirmişlerdir. Bir tanesi sonlu farklar metoduna dayanmaktadır ve topraktan havaya ısı değiştiricisinde enerji tasarrufu potansiyelini hesaplamaktadır. Bu modelde boru içersinde dolaşan suyun nemi de dikkate alınmıştır. Yapay sinir ağı konseptine dayanan ikinci model, tasarımcıya topraktan havaya ısı değiştiricinin her yönünü ve sistematığını değerlendirmeye yarayan bilgisayar destekli tasarım aracı ile yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Esen et al.[23], yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı değiştirici etrafındaki sıcaklık değişimini hesaplamak için nümerik bir model çalışmışlardır. Deneysel çalışma ile 2002-2003 yılları ısıtma sezonu için toprak sıcaklık dağılımları ölçülmüştür. Çizgisel model ile yarı sonsuz katı için zamana bağlı sıcaklık değişimini analitik olarak çözmüşlerdir.

Esen et. al [24, 25], yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı değiştiricilerinin derinliğe bağlı performans değişimini çalışmışlardır.

Florides ve Kalogirou [26], toprak kaynaklı ısı değiştiricilerin performansını değerlendirerek nümerik bir model oluşturulmuşlardır. Bu çalışmaya göre toprak yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerde sıcaklık profilinin dış iklim koşullarından etkileneceğini ve analiz yapılacağı zaman bu durumun göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Lee et. al [27], topraktan havaya ısı değiştiricilerinin simulasyonu için EnergyPlus programı ile entegre olan yeni bir modül geliştirmiştir, ve soğutma sezonu boyunca boru çapı, boru uzunluğu, debi, boru uzunluğu gibi parametrelerin etkisini araştırmak için duyarlılık analizi gerçekteşirmiştir.

Demir et. al. [28], yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı değiştiricileri için Matlab programı yardımı ile iki boyutlu nümerik analiz yapmıştır. Oluşturulan modelde yüzey için meteorolojik datalar alınarak sınır koşulu olarak eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Bansal et. al [29], ısıtma sezonu için topraktan havaya ısı değiştiricilerinin performansını FLUENT yazılımı ile araştırmışlardır. Hindistan'dan alınan deneysel veriler ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı boru malzemesi ve akış hızının sistem performansına etkisini araştırmaktır. Yapılan çalışmada akış hızının

performansı etkilediği, ancak boru malzemesinin önemli bir etkisinin olmadığı bulunmuştur.

Eicker and Vorschulz [30], nümerik çalışmaları, bir yapının soğutmasının GHE kullanılarak yapılabileceğini fakat kullanılacak kaynak sıcaklığının istenilen iç sıcaklıktan daha düşük olduğu durumda yapılabileceğini göstermektedir.

Li et. al. [31], yaptıkları çalışma da yeni çok fonksiyonlu toprak kaynaklı ısı pompasını anlatmışlardır. Makaleye göre bu ısı pompası ile sıcak su sağlanırken, topraktan atılan/çekilen ısı nedeni ile toprakta meydana gelebilecek ısı dengesizlikleri azaltmak için ısıtma/soğutma da sağlanmaktadır. Yangtze nehri, Çin çevresi iklim koşulları kullanılarak boruların etrafındaki toprak sıcaklıkları ve ısı transferi karakteristiği çalışılmıştır. FLUENT yazılımı ile üç boyutlu modelleme yapılmıştır. Boru yakınlarındaki sıcaklık değişimi uzun yıllar için yapılan simülasyon sonucu gözlenmiştir. Sonuçlar, yazın toprağa sıcaklık atılması sonucu toprak sıcaklığının arttığını göstermektedir ki bu da sistem performansını kötüleştirmektedir. Yapılan 7 yıllık analizde sistem yılda 90 gün 12 saat çalıştırılmıştır. Çalışma da kışın ısıtma düşünülmemiştir.

Tittlein et. al [32], topraktan suya ısı değiştiricisi nümerik modeline tepki faktörü eklemiştir ve sonlu elemanlar modeli ile iki boyutlu ısı iletimi modelini çözmüştür.

Zhang et. al [33], yapay sinir ağına dayalı ısı taşınımı algoritmasından meydana gelen nümerik bir metot geliştirmişlerdir. Bu algoritma ortalama lokal Nusselt sayısını boru boyunca tahmin etmekte olup, sonlu farklar analizine dayanan 3 boyutlu zamana bağlı ısı transfer modeline entegre edilmiştir, böylece ısı değiştiriciler etrafındaki ısı iletimi çalışılmıştır.

Bansal et al. [34] ve Vazetal. [35] FLUENT programı yardımıyla topraktan havaya ısı değiştiricilerin ısıtma ve soğutma kapasitelerini belirlemek için hesaplamalı akışkanlar yöntemi ile birçok nümerik çalışma yapmışlardır.

Benazza et al. [36], 3 boyutlu yatay ısı değiştirici modelleyerek borulara sabit sıcaklık tanımlamıştır. Farklı toprak çeşitlerine göre analizler yapmışlardır. Ayrıca devamlı ve aralıklı çalışma durumu için ısı değiştirici performanslarını belirlemişlerdir.

Gonzalez et. al [37], 1m derinliğe gömülen toprak kaynaklı ısı değiştiricisinden çekilen ısı ile toprağın fiziksel yapısının değişimini çalışmıştır.

Colangelo et. al [38], ısıtma ve soğutma yapılan binalarda toprak kaynaklı ısı pompası için verimlilik ve enerji analizini FLUENT yazılımını kullanarak ısıtma ve soğutma sezonunu kapsamaları için 1 yıllık olarak yapmışlardır. Yapılan analize göre ısı transferi performansı için en önemli parametrenin ısı değiştirici etrafındaki toprağın ısı iletkenliği olduğu görülmüştür. Boruların içerisinde dolaşan suyun hızı da önemli olan diğer bir parametredir.

Yapılan analizde düz boru, slinky ve helisel olarak yerleştirilen borular için su hızı, toprak ısı karakteristiği, boru çapı ve aralığı gibi parametreler çalışılmıştır. Helisel yerleştirilen boruların diğer yerleştirilen borulara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Toprağın ısı iletim katsayısı 3 iken elde edilen sonuçların 1 olduğu duruma kıyasla iki katı olduğu görülmüştür. Ayrıca kazı maliyetleri ve performans düşünüldüğünde en iyi derinliğin 1,5 m olduğunu söylemişlerdir.

Misra et al. [39], sürekli çalışma koşulu, toprağın termal iletkenliği, boru çapı ve akış hızı gibi zamana bağlı koşullarda toprak kaynaklı ısı değiştiricinin termal performansını analiz etmişlerdir. Toprak kaynaklı ısı değiştiricinin sürekli kullanım nedeni ile boru çapının etkisinin toprağın yüksek iletkenliğe sahip olduğu duruma göre termal performansa etkisinin en az olduğunu sonuçlardan çıkarılmaktadır. Ayrıca su hızının artmasıyla sistemin termal performansının kötüye gittiği görülmektedir.

Florides et. al [40], yatay ve dikey döşenmiş toprak kaynaklı ısı değiştiricilerinin sıcaklık etkisini ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda boruların yakınında yer alan bölgelerde sıcaklık değişimi olduğu gözlenmiştir. İki boru çeşidi için, farklı toprak tipleri kullanılarak analiz edilmiştir. ısı iletkenliği daha fazla olan toprak türünde ısının daha hızlı yayıldığı gözlenmiştir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları yenilebilir enerji kaynakları olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Isıtma yapılan binalarda bu sistemin kullanılmasıyla, toprak sıcaklığının ve sistem performansının düşmesine neden olabilecek ısı dengesizlikler oluşabilir. Li et. al [41], yapılan çalışmaya göre absorpsiyonlu ısı pompasının kullanıldığı sistemde diğer sisteme göre toprak 4-6 C daha fazladır. Absorpsiyonlu ısı pompasının

elektrikle çalışan ısı pompasına göre topraktan daha az ısı çektiği ve toprağa daha az ısı attığı görülmüştür, böylece soğuk bölgelerde oluşabilecek ısı dengesizliklerin önüne geçilmiş olur. Özet olarak önerilen sistemin daha verimli olması ve termal dengesizlikleri engellemesi nedeni ile soğuk bölgelerde kullanılması önerilmektedir.

Nam et. al [42], enerji temeli uygulamasında uygun dizayn şartlarını bulabilmek için, toprak ısı değişim oranının hesaplandığı nümerik analiz modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen model toprak ısı transferi modeli ile birlikte çalışmaktadır. “Case study”lerde boru aralığı, gömme derinliği, boru çapı, su sıcaklığı gibi parametreler çalışılmıştır. Çalışma sonucunda borular etrafındaki toprak sıcaklığının yaz aylarında arttığı, kış aylarında ise azaldığı görülmüştür.

Simms et. al [43], yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı değiştiricilerinde toprağın homojenliğinin termal özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Heterojen yapıya sahip ortamda çalışan sistemin %2 daha az maliyeti olacağını belirtmişlerdir. Boruların arası mesafenin 50cm olduğu durumda kısa devre etkisinin aza indirildiği, 40cm lik mesafenin ise uygulama esnasında sorunlara neden olabileceğini, daha az mesafelerde ise sistemin çalışmamasına neden olabileceğinden bahsetmişlerdir. 1,5 m derinliğe gömülü borularda yüzey etkisinin en aza indirildiği, daha derinliğe gömüldüğünde daha yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür. Dirichlet sınır koşulları toprak yüzeyine verilmiştir. Oluşturulan modelin alt, üst ve yan bölümlerine ise Neumann sıfır ısı akısı koşulları verilmiş olup analiz yapılmıştır.

Capozza et. al [44], binanın yük profilinde dengesizliklere neden olan toprak sıcaklık yığılmalarını belirlemek için çalışma yapmışlardır. Kullanılan nümerik model literatürde bulunanlar ile karşılaştırılmıştır. Fazla yük ve boru sayısı ile nümerik model sezonsal sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar topraktan çekilen ve toprağa atılan ısı arasındaki oranın, yeniden dengeleme, enerji açısından incelendiğinde uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Yapılan çalışmalardan görüleceği gibi ısı dengesizliğinin önlenmesiyle sıcaklık yığılmalarının da önüne geçilmesine neden olacaktır. Sonuçlara bakıldığında kullanılan boru sayısının artmasının sıcaklık yığılmasına bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Sezonsal sıcaklık farklılıkları ihmal edilecek kadar az ise, sıcaklık yığılmaları da ihmal edilebilir olacaktır.

Metz [45] , yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı pompasını New York'ta 104m² lik bir evin ısıtma ve soğutması için kullanmıştır. 1 yıllık izleme periyodu boyunca ısıtma için COP_H 2.46 iken soğutma da COP_C 1.91 dir. Tipik bir ısı pompasının COP'si 4 dür.

Doherty et. al [46], Nottingham Üniversitesi, İngiltere'de yatay slinky borularını serdikten ve sistemi çalıştırdıktan sonra deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çıkan sonuca göre ortalama COP 2.7 dir.

Coskun et. al [47], yatay döşenmiş ısı değiştiricisinin Bursa, Türkiye için soğutma sezonunda performansını çalışmışlardır. Borular 2m de gömülüdür. Sistem soğutma performansı 2-2,5 dur.

İngiltere'de yatay döşenmiş toprak kaynaklı ısı pompası ile ilgili oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. [48, 49, 50, 51]Bazı çalışmalarda sistemin toprak sıcaklığına etkisini incelemek için uzun süreli analiz yapılmıştır. Bu etki sistemin ömrü boyunca istenilen performansa ulaşmak için gerekli olan ısı pompası boyutlarını seçmek için oldukça önemlidir.

1.2 Tezin Amacı

Enerji kaynakları yenilenemeyen ve yenilenebilen kaynaklar olarak iki grupta toplanır. Yenilenemeyen enerji kaynakları taşkömürü, linyit, petrol ve doğal gazdan oluşan fosil yakıtlar ile nükleer enerji gibi rezervi sınırlı olan ve tükendiğinde yenilenemeyen kaynaklardır. Yenilenebilen enerji kaynakları ise güneş, rüzgar, su ve jeotermal enerjiden oluşan ve kendi kendilerini yenileyebilen kaynaklardır.

Sanayi devriminden beri, özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri gibi çeşitli insan etkinlikleri ile atmosfere salınan sera gazlarının(CO₂, CH₄, H₂O, ...) atmosferdeki birikimlerindeki hızlı artışa ve çeşitli doğal nedenlere bağlı olarak yeryüzündeki ve atmosferin alt bölümlerindeki sıcaklık artışına “küresel ısınma” adı verilmektedir.

Küresel ısınmaya yol açan sera gazları; temel olarak fosil yakıtların yakılması, sanayi, ulaştırma, arazi kullanımı değişikliği, katı atık yönetimi ve tarımsal etkinliklerden kaynaklanmaktadır. Günümüzde dünyada yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımı daha yaygındır. Bu kaynakların hem üretim aşamasında hem de kullanımı

sonrasında büyük ölçüde çevre sorunları yaşanır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gereklidir.

Ülkemiz yenilenebilen enerji kaynakları bakımından büyük bir potansiyele sahiptir. Yerlilik ve yenilik unsurları ile de bütünleştirilmiş yenilenebilir enerji kaynaklarımızın harekete geçirilmesi temiz çevre gereklerinin yerine getirilmesinde ve enerji ihtiyaçlarının yerinden üretim yaklaşımı ile karşılanmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışma da yenilenebilir enerji kaynağı olan “toprak kaynaklı ısı kaynaklı ısı pompası” sistemi için İstanbul ili iklim verileri kullanılarak performans analizi yapılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği kullanılarak oluşturulan modelin analizi yapılmış olup, farklı parametreler kullanılarak optimum koşullar elde edilmiştir.

1.3 Hipotez

Toprak kaynaklı ısı değiştiricileri için literatürde analitik, deneysel ve sayısal olmak üzere fazla sayıda kaynak bulunmaktadır. 1.1 bölümünde incelenen ve bu çalışmaya yön veren yayınlar incelenmiştir.

Daha önce yapılan sayısal çalışmalarda oluşturulan modeller su, boru ve toprak olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın başında yapılan çalışmalarda, su, boru ve toprağın birlikte olduğu bölümlerde analizin çok uzun sürdüğü görülmüş olup, sonraki modellerde boru modelden çıkarılmıştır.

Su-toprak arasında gerçekleşen ısı transferi C kodu yazılarak her iterasyonda modele verilmiştir.

İncelenmiş olan bu çalışmalarda, dış hava şartlarının zaman bağlı değişken verilmediği görülmüştür. Daha doğru veri elde etmek için bu çalışmada C kodu yazılarak, dış hava şartları zamana bağlı değiştirilmiştir. Bu kodda toprak yüzeyi ile hava arasındaki ısı transferi detaylı olarak incelenmiştir.

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Günümüzde fosil yakıtların tüketim hızının sürekli artması ve rezervlerin sınırlı olması yeni enerji kaynaklarının araştırılmasını gündeme getirmiştir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

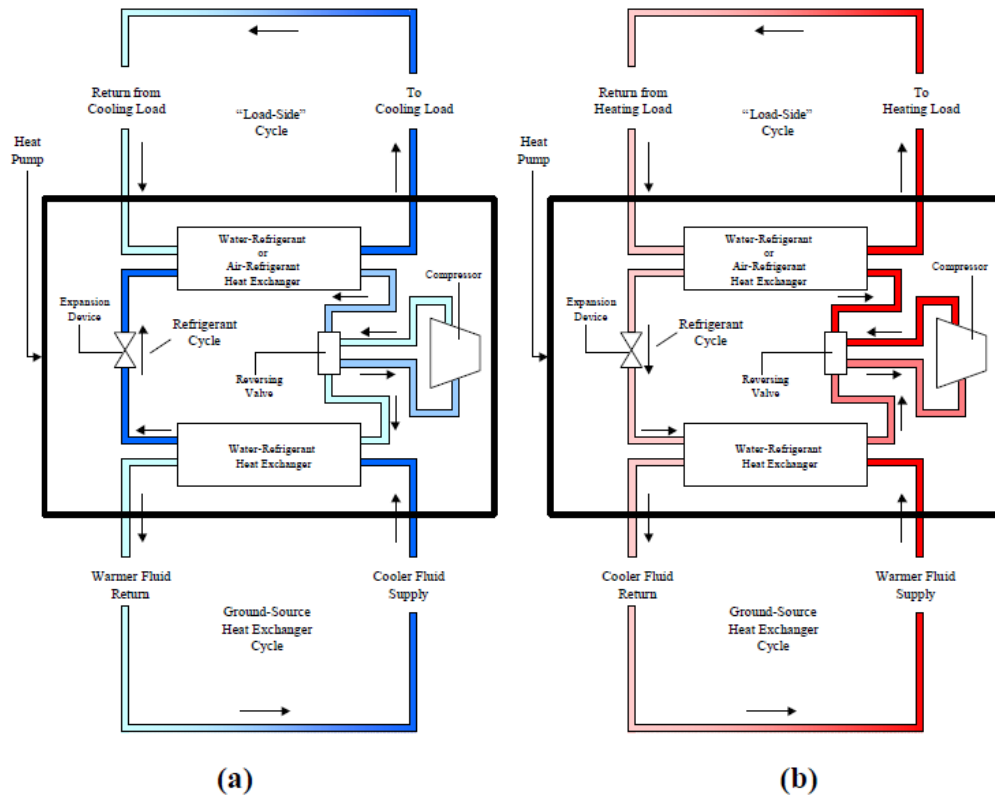
Toprak kaynaklı ısı pompaları, ya da jeotermal ısı pompaları, son yıllarda konut ve ticari yapıların ısıtma ve soğutmasında kullanılan alternatif bir enerji kaynağı olmuştur.

İlk toprak kaynaklı ısı pompasının patenti 1912 yılında İsveç'te alınmış olup 1950'ler de Amerika'da kullanılmaya başlanmıştır. Villa kullanımı ile başlayan sistem zamanla yüksek binalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Veriminin yüksek ancak sistemin pahalı olması nedeniyle çok talep görmeyen sistem sağladığı enerji tasarrufu nedeniyle, artan kullanım ve ucuzlayan fiyatlarıyla hızla artan birçok farklı bir kullanıma sahiptir. Bugün toprak kaynaklı ısı pompaları Avrupa ve Amerika'da enerji tasarruf amaçlı olarak devlet ve çevre örgütlerince tavsiye edilen bir sistem niteliğine kavuşmuştur. Türkiye'de ise toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanımı gitgide yaygınlaşmaktadır. [52]

Toprak kaynaklı ısı pompaları, toprağın veya yeraltı suyunun yaz ve kış aylarında hemen hemen sabit denebilecek sıcaklıktaki enerjisinden faydalanmak suretiyle kışın ısıtma, yazın ise soğutma amacıyla kullanılır. Yazın mahalden alınan ısı, bir ısı pompası yardımıyla toprağa veya yeraltı suyuna aktarılırken, kışın mahali ısıtmak için gerekli ısı, yine aynı cihaz vasıtasıyla topraktan veya yeraltı suyundan alınabilir.[53]

Toprak kaynaklı ısı pompaları Şekil 2.1'de görüldüğü şekilde üç döngüden oluşmaktadır. Birinci çevrim, "load-side", binayı ısıtmak ve soğutmak için gerekli olan ısıtma-soğutma sistemini anlatmaktadır. İkinci çevrim ise, bina ile toprak bağlantısı arasında ısı

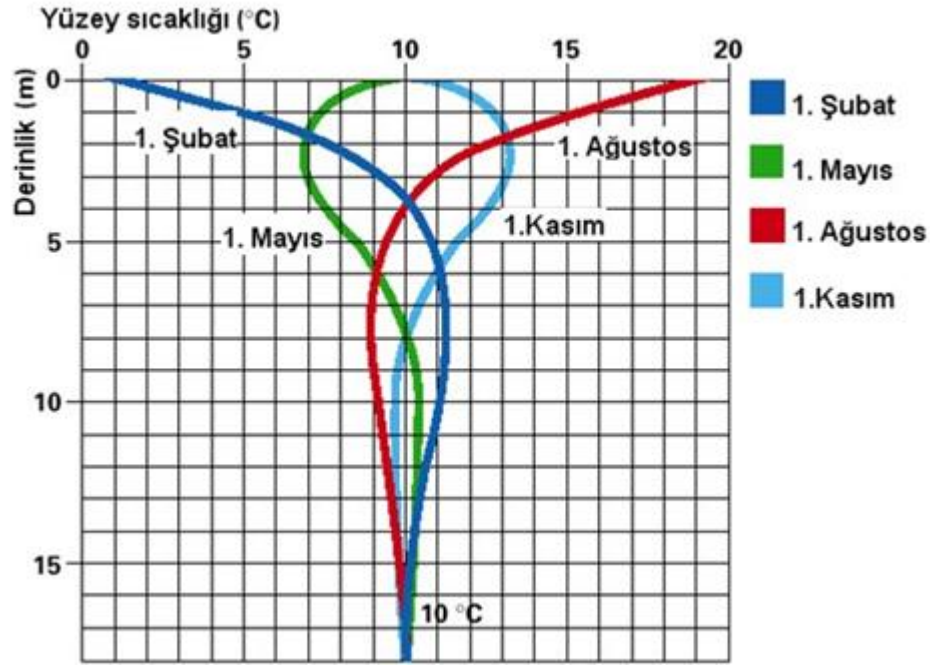
aktarımını sağlayan bir ısı pompası sistemi, üçüncü çevrim ise topraktaki ısıyı transfer etmek için gerekli olan toprak ısı değıştiricisi sistemini göstermektedir.



Şekil 2.1 TKIP soğutma(a) ve ısıtma (b) modu [54]

Isı pompalarının verimleri enerji pompaladıkları dış ortam sıcaklığına bağı olarak büyük değışim gösterir. İnsanların yaz ve kış aylarında istemiş olduğı konfor şartı çok değışmez 24 °C 'nin bir iki derece altında veya üzerindedir. Kışın çok ısıya ihtiyacımız olduğunda dış hava sıcaklığı en düşük seviyelere iner. Yazın ise tam tersi içerden dışarı ısı atmak isteriz, bu sefer dış hava sıcaklığı en yüksek seviyelere çıkmaya başlar. Yani her iki durumda da iç ortam ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkı büyük değerlere ulaşır, bu da ısı pompaları için düşük verim demektir. Hava sıcaklığı tüm yıl boyunca diğ er doğal ortamlara göre çok büyük değışim gösterirken, toprak geç ısınıp geç soğuduğı için, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin performans katsayısı kararlı bir yapıdadır ve dış hava sıcaklığından fazla etkilenmez. [55]

Toprak sıcaklığının derinliğ e göre değışimi yılın belirli günleri için aşağıdaki şek il de verilmiştir. Buna göre derinlik arttıkça yıl ve gün boyunca gerçekleş en sıcaklık dalgalanmaları azalır ve belirli bir derinliğin altında sıcaklık sabit olarak kabul edilebilir.



Şekil 2.2 Yılın farklı günleri için toprağın derinliğe bağlı sıcaklık değişimi

Toprak kaynaklı ısı pompalarının performans katsayılarının yüksek olması sistemin işletme maliyetini azaltmaktadır. Elde edilen enerjinin, sarf edilen enerjiden daha yüksek olması ile sağlanan enerji tasarrufu hem kullanıcıya hem de ülke ekonomisine önemli kazançlar sağlar. Ancak ısı kaynağı olarak toprağın kullanımında, ilk yatırım maliyetini artıran toprak ısı değiştiricisi mevcuttur. Bu nedenle, hava kaynaklı ısı pompalarına göre ilk yatırım maliyeti fazla olmaktadır. Bu maliyetin düşürülebilmesi için öncelikle, toprağa ait jeolojik birimlerin sıcaklık ve ısı depolama yükü, toprağın yapısı, termal özellikleri, nem ve yer altı su seviyesi ile iklim koşullarına göre değişimi incelenmelidir. [56]

Havaya göre daha verimli olan bu sistemleri geliştirmek ve enerji tasarrufuna yardımcı olmak için bu sistemlerin kullanımını ülkemizde yaygınlaştırılmalıdır.

2.1 TKIP Tarihçesi

Isı pompalarının temel prensibinin 1824 yılında Nicholas Carnot tarafından ortaya atılmasından sonra bu teori, 1850’de Lord Kelvin’in soğutma makinelerinin, ısıtma amacıyla kullanılabilirliğini teklif etmesi ile 30 yıl daha geç gerçekleştirilebilmiştir. Lord Kelvin, iş yapan akışkan olarak havayı kullanmak suretiyle bir ısı pompası yapmıştır. Bu

makinede, çevre havası silindire çekilerek genişletilmiş; böylece havanın basınç ve sıcaklığı düşürülmüştür. Bu düşük sıcaklık ve basınçtaki hava, dışarı yerleştirilen bir havadan havaya ısı değiştiricisinden geçirilerek çevre havasından ısı çekmiştir. Binanın içine ısıtılmış hava verilmeden önce, hava atmosferik basınca kadar tekrar sıkıştırılarak, sıcaklık çevre havasının üzerine çıkartılmıştır. İsviçre’de dizayn edilen bu makinenin başarılı bir uygulama olduğu görülmüştür. [57]

Toprak kaynaklı sistemlere olan ilgi, Oklahoma Eyalet Üniversitesi’nde, güneş enerjisi takviyeli ısı pompası sistemleri üzerine yapılan araştırmalar sırasında ortaya çıktı. Isı pompalarını enerji depolamada takviye etmek ve toprakla temas sonucu fazladan enerji depolamak amacıyla; büyük, yalıtılmış, gömülü depolar tasarlandı. [58]

Yüzey alanı/hacim oranı büyük olan sistemlerin (uzun ve ince bir tank ya da bir boru) en iyi olduğunu anlamak uzun sürmedi. Enerjinin, kolektörler yerine topraktan daha kolay ve daha ucuza elde edilebileceği görüldüncə, güneş enerjili sistemlere olan ilgi azaldı.

TKIP üzerinde detaylı çalışmalar, ikinci dünya savaşından sonra başlamış ve son 20 yıl içerisinde bu konu üzerindeki çalışmalar iyice yoğunlaşmıştır. 1950'lerde, önce Ingersoll daha sonra Penrod topraktan, borular vasıtası ile ısı çekilmesinin matematik olarak modellenmesi üzerinde çalışmış ve topraktaki sıcaklık dağılımlarını iyi bir yaklaşımla elde etmiştir. Son yıllarda Baker da konutlar için toprak kaynaklı ısı pompaları uygulamalarında, toprak ısı değiştiricilerinin tasarımı üzerinde çalışmış ve yaptığı deneysel çalışmada elde ettiği sonuçların, teorik olarak elde edilen sonuçlara uygunluğunu göstermiştir.

Son yıllarda bu konuda özellikle Amerika Birleşik Devletleri, İsveç ve Kanada’da çalışmalar yapılmıştır. ABD’de Kavanaugh dikey toprak ısı değiştiricilerinde ısı geçişini incelemiş, ayrıca U-tüp ve eş eksenli dikey ısı değiştiriciler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Eş eksenli dikey ısı değiştiricileri üzerinde, ayrıca Oklahoma Eyalet Üniversitesi, Kuzey Carolina Eyalet Üniversitesi ve Louisiana Eyalet Üniversitesi’nde araştırmalar yapılmıştır. İsveç’te ise çalışmalar, bölünmüş tip ısı değiştiricileri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yine ABD'de, Bose çeşitli şekillerde yerleştirilmiş yatay toprak ısı değıştiricileri üzerinde çalışmıştır. Bose toprak kaynaklı ısı pompalarının, güneş enerjisinden kaynak olarak faydalanan ısı pompalarıyla birlikte çalışmalarını da incelemiştir. Yine bu konu üzerinde Avrupa Ekonomik Topluluğu Komisyonu, bir fizibilite çalışması yaptırarak, sistemin Kopenhag, Paris ve Marsilya'da uygunluğunu araştırmıştır. [59]

Ülkemiz jeotermal enerji potansiyeli bakımından dünyanın zengin ülkelerindendir. TKIP, 1995 yılından beri, Amerika' da ve Avrupa'da % 59 veya yıllık % 9,7 olarak en fazla gelişme göstermiştir. TKIP için 2015 yılı itibari ile dünya genelinde TKIP kullanımı ile ilgili bilgiler Çizelge 2.1'de görölmektedir.

Çizelge 2.1 Dünya genelinde TKIP kullanımı [60]

Ülke	MWt	TJ/yıl	GWH/yıl
Almanya	2.848,60	19.531,30	5.425,80
Amerika	17.415,91	75.862,20	21.074,52
Avustralya	16,09	194,36	53,99
Avusturya	903,40	6.538,00	1.816,26
Bulgaristan	93,11	1.224,42	340,14
Çek Cumhuriyeti	304,5	1.790,00	497,26
Danimarka	353,00	3.755,00	1.043,14
Finlandiya	1.560,00	18.000,00	5.000,40
Fransa	2.346,90	15.867,00	4.407,85
Hollanda	790,00	6.426,00	1.785,14
İngiltere	283,76	1.906,50	529,63
İsveç	5.600,00	51.920,00	14.423,38

Çizelge 2.2 Dünya genelinde TKIP kullanımı (devamı) [60]

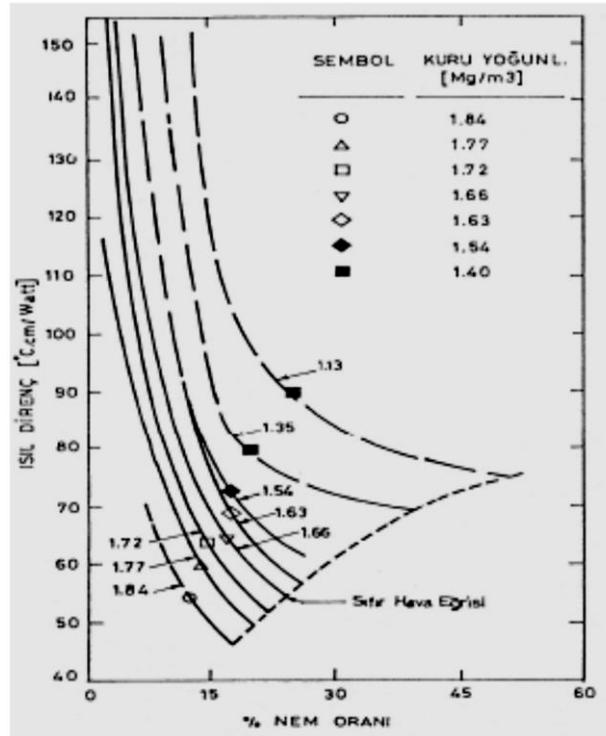
İsviçre	1.733,08	11.836,80	3.288,26
İtalya	1.014,00	8.682,00	2.411,90
İzlanda	2.040,00	24.717,00	7.422,00
Japonya	2.186,17	26.130,08	7.258,94
Kanada	1.466,78	11.615,00	3.226,65
Litvanya	94,60	712,90	198,04
Macaristan	905,58	10.268,06	2.852,47
Norveç	1.300,00	8.260,00	2.294,63
Polonya	488,84	2.742,60	761,89
Rusya	308,20	6.143,50	1.706,00
Sırbistan	115,64	1.802,48	500,73
Slovenya	152,75	1.137,23	315,93
Türkiye	2.886,30	45.126,00	12.536,00
Yunanistan	221,88	1.326,45	368,49

2.2 Toprak Özellikleri

Toprak kaynaklı ısı pompaları için temel kaynak olan toprağın ısıl davranışını kontrol eden üç faktör vardır. Bunlar; toprağın yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve toprağı oluşturan tanelerin materyal özellikleridir. [61]

2.2.1 Yoğunluk

Toprağın yoğunluğu, bileşimine ve doğal konumdaki yerleşme veya yerleştirme şekline bağlıdır. Isı iletim katsayısını tahmin edebilmek için, kuru yoğunluk (g) ve nem oranı (ω) belirlenmelidir. Toprağın nem oranına bağlı olarak buna karşılık gelen bir kuru yoğunluk değeri vardır. Toprak Özellikleri Ölçüm Standartları ASTM' de mevcuttur. Şekil 2.3'de değişik yoğunluklarda ve buna karşı gelen nem oranlarında, toprağın ısı direnci gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Toprak ısı direncinin nem ve yoğunluk içeriğine göre değişimi [62]

2.2.2 Nem oranı

Belli bir yoğunluk için nem miktarının artışı, toprak ısı direncinin düşmesine sebebiyet vermektedir. Çünkü sabit kuru yoğunlukta, nem oranı arttıkça, daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olan hava, yerini suya bırakır.

2.2.3 Tanecik Materyali

Toprağın ısı davranışını, katı taneciklerin ısı iletkenlikleri önemli ölçüde etkiler. Çizelge 2.2'de toprakta bulunan bazı materyallerin ısı karakteristikleri verilmiştir (Ünlü, 2005).

Çizelge 2.3 Toprak Özelliklerinin Tipik Karakteristik Özellikleri

Malzeme	Isıl Direnç (mC/W)	Isıl İletkenlik (W/mC)
Kuartz	0,11	9,2
Granit	0,25-0,28	4,0-3,6
Kireçli taş	0,45	2,2
Kum taşı	0,58	1,7
Mika	1,7	0,59
Islak	4.0	0,25
Kuru	7.0	0,14
Su	1.65	0,60
Hava	41	0,025
Buz	0.78	2,23

Yüksek yoğunluğu ile kuartz tercih edilen bir malzemedir ve nem tutucu özelliği vardır. Kil ile bağlantılı olarak bulunmasından dolayı, killi topraklar tercih edilen topraklar arasındadır. Toprakta bulunan bazı materyallerin ısı karakteristikleri Çizelge 2.3’de görülmektedir.

Çizelge 2.4 Çeşitli toprak türlerinin ısı karakteristikleri

Malzeme	Isıl Direnç (mC/W)	Isıl İletkenlik (W/mC)
Kum dolgu	2,0	0,5
Nemli kumlu kil	0,8-0,9	1,25-1,11
Sıkı kum	0,8-0,9	1,25-1,11
Nemli kil	0,8-0,9	1,25-1,11
Gevrek kuru kum	1,75	0,57

Daha iyi bir toprak kalitesi için kuyuyu kapamak için mümkünse daha yüksek yoğunlukta bir toprak ile doldurulmalıdır. Bu mümkün değilse hendekten çıkartılan toprak sıkıştırılarak konulmalıdır.

2.3 TKIP Elemanları ve Çalışma Prensibi

Toprak kaynaklı ısı pompaları üç ana kısımdan meydana gelir;

1. Toprak ısı değiştiricileri
2. Isı pompası
3. Isı dağıtım sistemi

2.3.1 Toprak Isı Değiştiricileri

Toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla ısıtma sezonunda ısı, toprak ısı değiştiricisinde dolaşan akışkandan çekilir ve hava kanallı sistemlerle veya sıcak sulu sistemlerle binaya dağıtılır. Soğutma sezonunda ise ısı, soğutulacak ortamdan çekilerek toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla toprak ısı değiştiricisine oradan da toprağa aktarılır. Sistemde toprağın altında belirli hesaplamalar sonucunda uzunlukları belirlenen polietilen borular bulunur. Buradan ısı kapalı devre akışkanı tarafından ısı pompası eşanjörüne taşınır. Bu devrede akışkanı taşıyan sirkülasyon pompası da bulunur. Akışkanın devridaim olayı böyle devam eder ve ısı bir yerden bir başka yere transfer edilir.

2.3.1.1 Açık Çevrimli Toprak Isı Değiştiricileri

Açık çevrimli sistemler kapalı çevrimli sistemlere göre daha az tercih edilmesine karşılık kaynak suyunun bol olduğu yerlerde kullanılabilirler, amaç maliyetin daha az olmasını sağlamaktır. Sistemde gömülü olan borunun içinden akan sıvı akışkan yerine, göl, kuyu gibi kaynaklardan gelen su kullanılır. Yeraltında bulunan su bir kuyudan çekildikten sonra ısı değiştiriciye ısı transferi yapıldıktan sonra tekrar geri boşaltılır. Bu boşaltma ya deşarj kuyusuna ya da tekrar alındığı kaynağa verilir. Hem su ihtiyacını karşılamakta hem de ısı pompasında kullanılan bir sistemdir.

Sistemde deşarj olayı mevcut olduğundan dolayı performansı yüksektir. Yıl boyunca da yer altı su sıcaklığının sabit olması sistemin avantajıdır.

Açık sistemlerin en önemli unsuru su kalitesinin yüksek olması gerekmesidir. Suda korozyona neden olacak maddelerin bulunması, mineraller ısı değıştiricisinde birikebilir, demir ve diğerkirler dönüşüm kuyusunu tıkayabilir. Bu yüzden suya aşındırıcılık, asitlik ve mineral içeriğı testlerinin yapılması gerekmektedir. Açık çevrimli sistem örneğı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Açık Çevrimli Toprak Kaynaklı Isı Değıştiricisi Örneğı [63]

2.3.1.2 Kapalı Çevrimli Toprak Isı Değıştiricileri

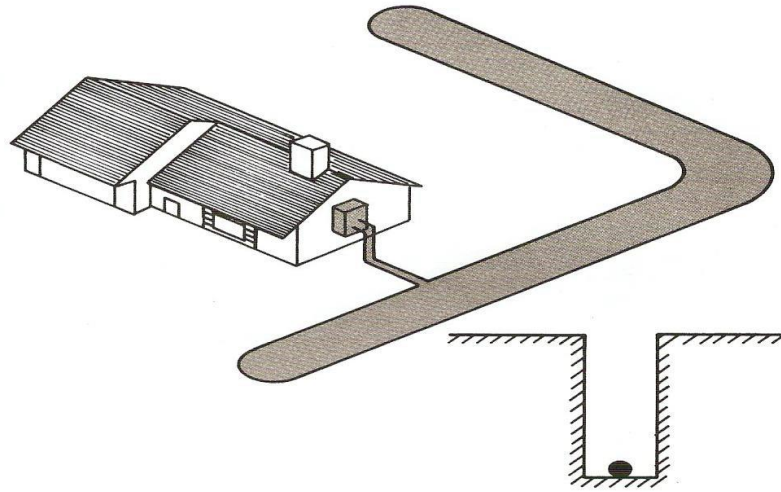
Toprak ısı değıştiricileri, gömölerek jeokütleye teması sağılayan boru düzenleridir. Isıtma sezonunda, jeokütlenin enerjisini ısı taşıyıcı akışkan yardımıyla ısı pompasının buharlaştırıcısına aktararak soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağılarken soğutma sezonunda da ısı pompasının yaşam alanlarından çektiğı ısıyı ısı pompasının yoğuşturucusundan alıp jeokütleye atarak çevrimini tamamlar.

Toprak ısı değıştiricileri kapalı çevrim esasına göre çalışır. Toprak ısı değıştiricilerinde ısı taşıyıcı akışkanın yenilenmesine gerek yoktur. Dolayısıyla bu sistemlerde kullanılan ısı taşıyıcı akışkan miktarı değışmez. Aynı akışkan ısı pompasında kullanıldıktan sonra, tekrar ısıtılmak veya tekrar soğutulmak üzere toprak ısı değıştiricisinde dolaştırılır. Boru düzenleri düşey veya yatay olabildiğı gibi spiral, helisel ve benzeri geometrilerde de olabilir. Bu geometrileri belirlerken boruların birbirleriyle olan ısı etkileşimleri göz önünde bulundurulmalıdır. [64]

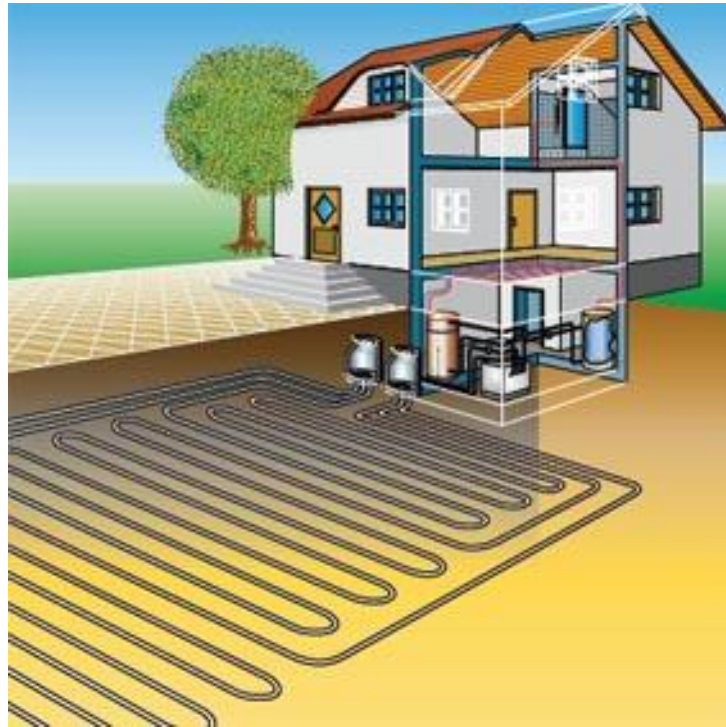
2.3.1.2.1 Yatay Tip Isı Değiştiriciler

Yatay toprak ısı pompaları, tek borulu, çoklu borulu ve serpantinli borulu olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

Tek borulu yatay TSIP, ilk olarak en azından 4 feet derinlikte dar hendekler halinde yerleştirilmektedir. Bu tasarım, yer alanının büyük bir kısmını istemektedir. Aşağıdaki Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’de tek borulu yatay TSIP sistemini göstermektedir. [65]

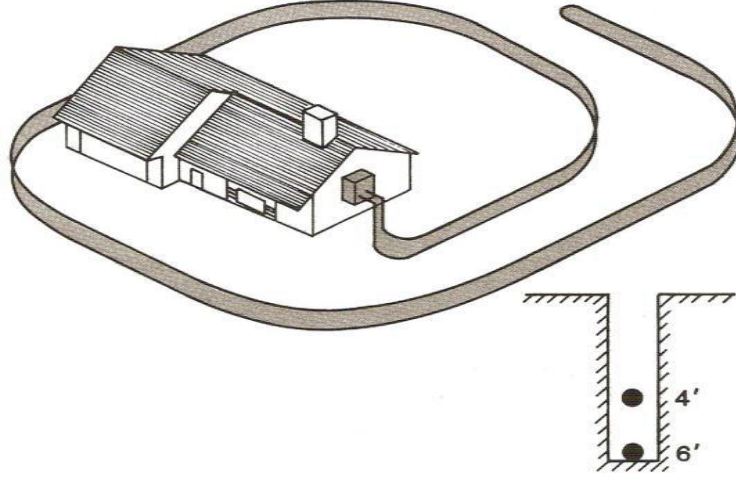


Şekil 2.5 Yatay Tip Isı Değiştirici Örneği [66]

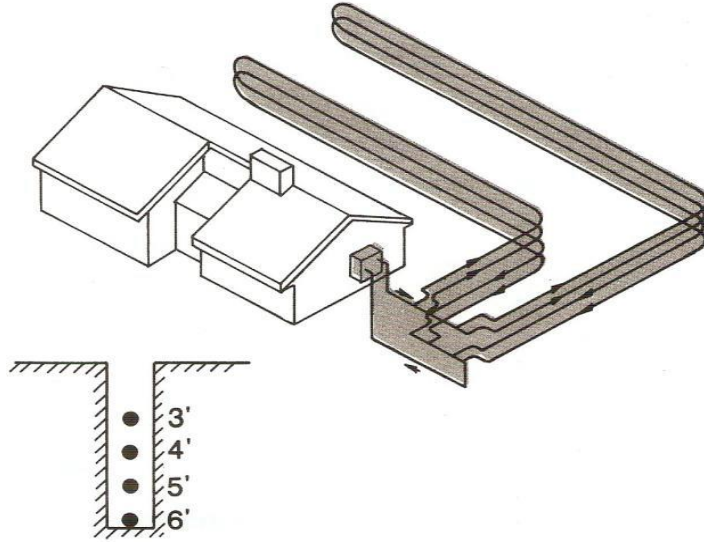


Şekil 2.6 Yatay Tip Isı Değiştirici Örneği [66]

Çoklu borular (genellikle 2 veya 4), istenen yer alanının miktarını azaltarak tek hendek içine yerleştirilir. Müteahhit tarafından, hem derin dar hendekler hem de geniş hendekler 12 inç'den 24 inç'e kadar ayrılmış borular ile kullanılırlar. Hendek uzunluğunun azaltılması mümkün olmasına rağmen, toplam boru uzunluğunun, bitişik borular ile ısı etkileşimini yenmek için çoklu borulu TSIP'nın ile artırılması zorunludur. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 iki ve dört borulu yatay TSIP sistemlerini göstermektedir. [65]



Şekil 2.7 İki borulu yatay TKIP sistemi [66]

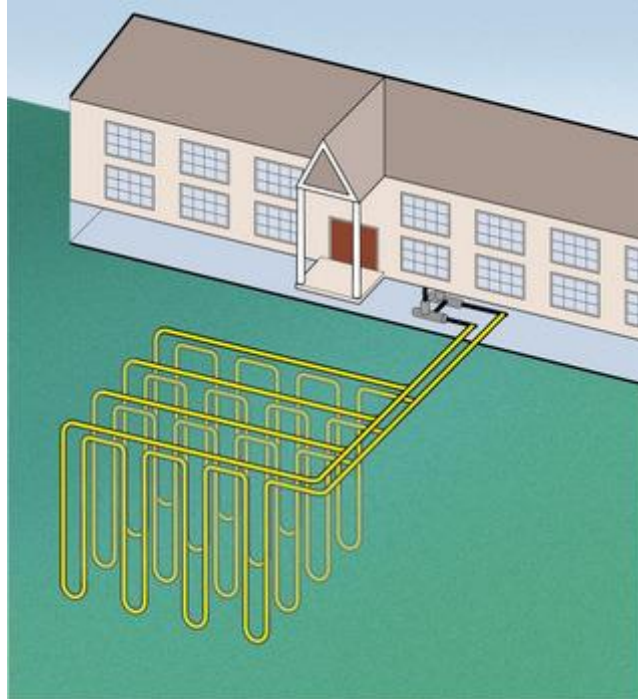


Şekil 2.8 Dört borulu yatay TKIP sistemi [66]

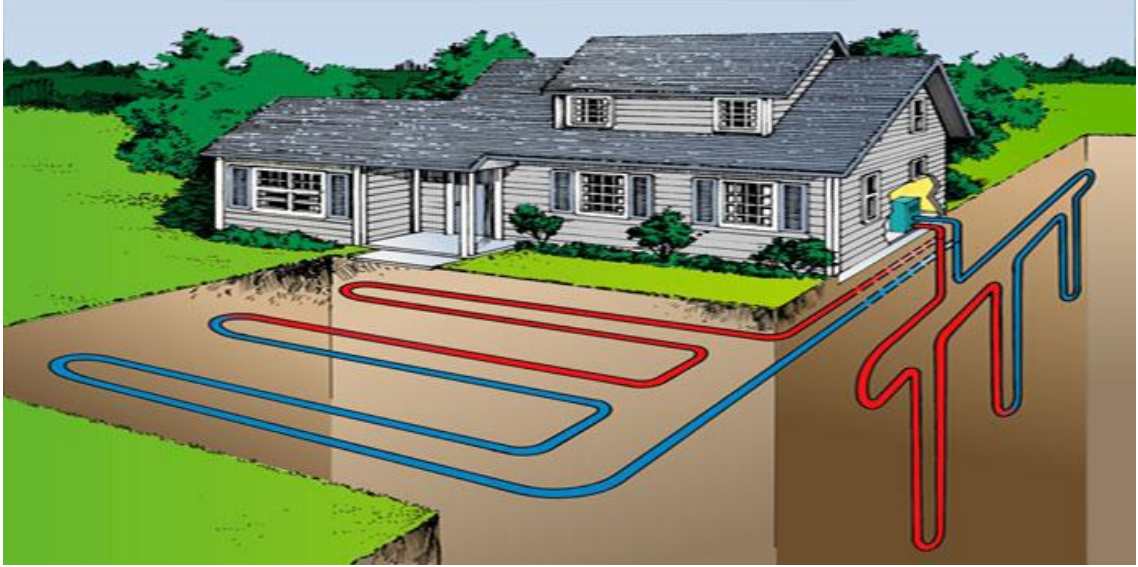
2.3.1.2.2 Dikey Tip Isı Değiştiriciler

Dikey TSIP, genellikle dikey bir sondaj deliği içinde, iki küçük çaplı yüksek yoğunluklu PE tüplerin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Borular, kapalı U şeklinde dönen deliğin altında termal olarak eritilip kaynaştırılmaktadır. Dikey tp ölçüleri, 3/4 in'ten 1 ½ in nominal çapa kadar uzanmaktadır. Sondaj deliğinde yerel delme koşulları ve mevcut ekipmana bağlı olarak 15,24 m - 182,88 m arasında yer alır.

Dikey TSIP'nın yararları; sıcaklık ve termal özellikler içinde çok küçük değişiklik gösteren toprak ile temasta olan yerin göreceli olarak küçük bir alanını gerektirmesi, boru ve pompalama enerjisinin en küçük olması ve en etkin TSIP sistem performansını vermesidir. Sakıncaları ise; uygun ekipman ve kurma personelinin sınırlı mevcudiyetinden dolayı, maliyetin tipik bir şekilde yüksek olmasıdır. [65]



şekil 2.9 Dikey Tip Isı Değiştirici rneği



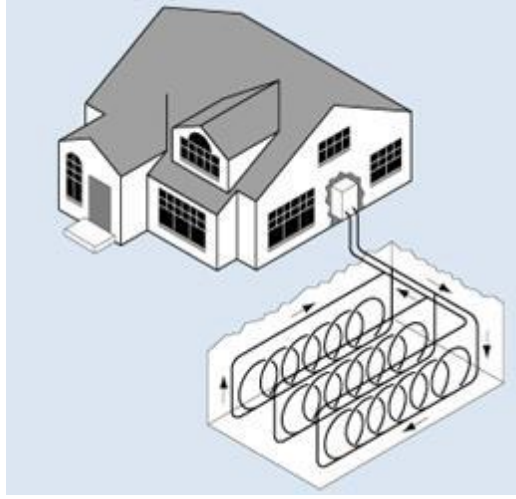
Şekil 2.10 Yatay ve Dikey TiP Isı Değiştirici Uygulaması Örneği

2.3.1.2.3 Slinky Tip Isı Değiştiriciler

Slinky tipi serpantin, istenen yer alanım azaltmak için kullanılabilir. Bu yatay toprak ısı değiştiricileri, geniş hendeğin altında, dar hendek veya yayılmış kat içine dikey olarak yerleştirilen yayılan serpantin içine sıkı serpantinden küçük çaplı PE tüpü uzatarak, kurulabilir. İstenen hendek uzunluğu, sadece tek borulu yatay TKIP'nın % 20'si % 30'dur, fakat boru uzunluğu, önemli bir şekilde, denk ısı performansı için artabilir. Şekil 2.11 slinky tipi yatay TKIP sistemini göstermektedir. [65]



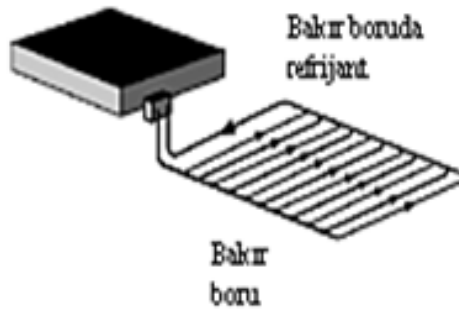
Şekil 2.11 Slinky Tip Isı Değiştirici Örneği



Şekil 2.12 Slinky Tip Isı Değiştirici Örneği

2.3.1.3 Doğrudan Genleşmeli Toprak Isı Değiştiricileri

Bakır borular soğutucu akışkan ile toprak arasındaki ısı geçişini doğrudan sağlamak için toprağın altına yerleştirilirler. Sonuç olarak, ısı geçişi özellikleri ve termodinamik performans artar. Borular, derin düşey çukurlara veya geniş yatay çukurlara gömülebilirler. Düşey yerleşimler kumlu, killi veya kuru topraklar için önerilmezler. Toprak ısı değiştiricisi metal olduğu için korozyona sebep olabilir. Kışın ısıtma amaçlı kullanımda, düşük toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı nedeniyle topraktaki nem donabilir. Biriken buzun genleşmesi borulara basınç uygulayarak bükülmesine sebep olabilir. Bununla nedenle toprak ısı değiştiricileri donma potansiyeli olan yeraltı su tabakalarına yakın bölgelere yerleştirilmemelidir. Yazın soğutma amaçlı kullanımda, yüksek toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı topraktaki nemin buharlaşmasına sebep olabilir. Buna bağlı olarak nem miktarının değişmesi toprağın ısı geçişi özelliklerini değiştirir. Toprakla doğrudan genleşmeli sistem arasında çok aşırı sıcaklık farkı mevcut olduğundan bu durumlar tasarım aşamasında göz önüne alınmalıdır.



Şekil 2.13 Doğrudan Genleşmeli Toprak Isı Değiştiricileri Örneği

2.3.2 Isı Pompası

Yazın toprak sıcaklığının, dış hava sıcaklığından daha düşük olduğu bilinmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompası soğutma sisteminde kullanılan akışkan, yoğuşturucuya gelerek ısını sıcaklığı daha düşük olan toprak ısı değiştiricisindeki suya dolayısıyla toprağa atarak yoğunur. Yoğuşan akışkan genleşme valfine gelir. Kılcal boru çıkışında sıvı ani genişleme sureti ile basıncı ve sıcaklığı düşer. Düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutucu akışkan buharlaştırıcıya gelerek burada buharlaşır. Buharlaştırıcı görevi yapan ısı değiştiricisinin bir tarafından soğutucu akışkan geçerken diğer tarafından pompa ile dolaşan su geçer. Isısını soğutucu akışkana bırakan su soğumuş olarak sisteme giderek hacmin soğutulmasını sağlar. Kışın ise sistem, ısıtma işlemini; bu kez topraktan ısı alıp, ısıtılması istenen hacme ısı vererek gerçekleştirir. [56]

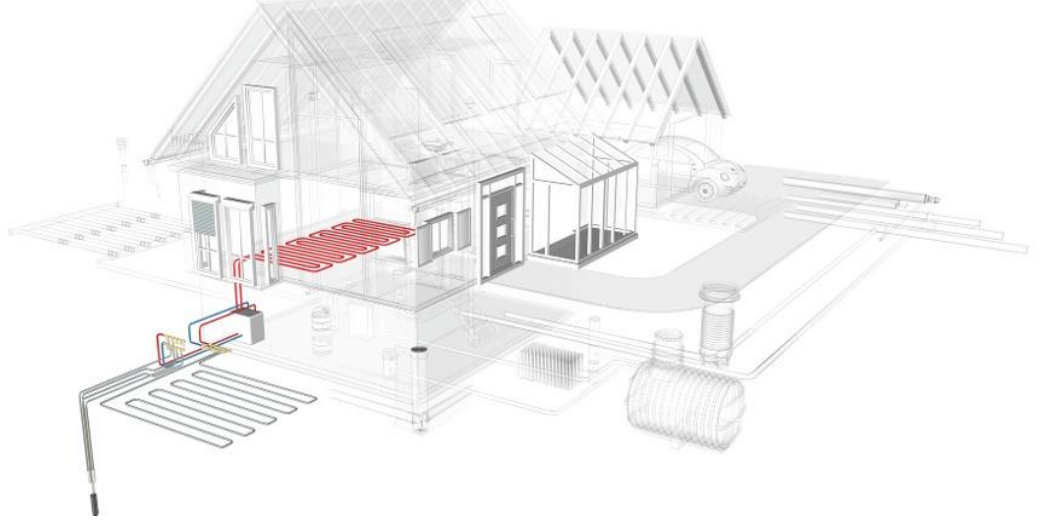
2.3.3 Isı Dağıtım Sistemi

2.3.3.1 Yüzeyden Isıtma ve Serinletme Sistemleri

Isı pompalarının verimi ısıtma devreleri ile ısı kaynağı arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Bu nedenle sistem mümkün olduğunca düşük gidiş suyu sıcaklıklarına göre tasarlanmalıdır. Isıtma devrelerinde bu gereksinim, düşük sıcaklıklı ısıtma ve soğutma sistemleri ile karşılanabilir.

Bu sistemlerde ek ısıtmaya gerek duyulmadan 35°C'lik gidiş ve 28°C'lik dönüş sıcaklıkları yeterli olmaktadır. Isı yalıtımı çok iyi olan konutlarda daha düşük değerler ile işletim mümkündür.

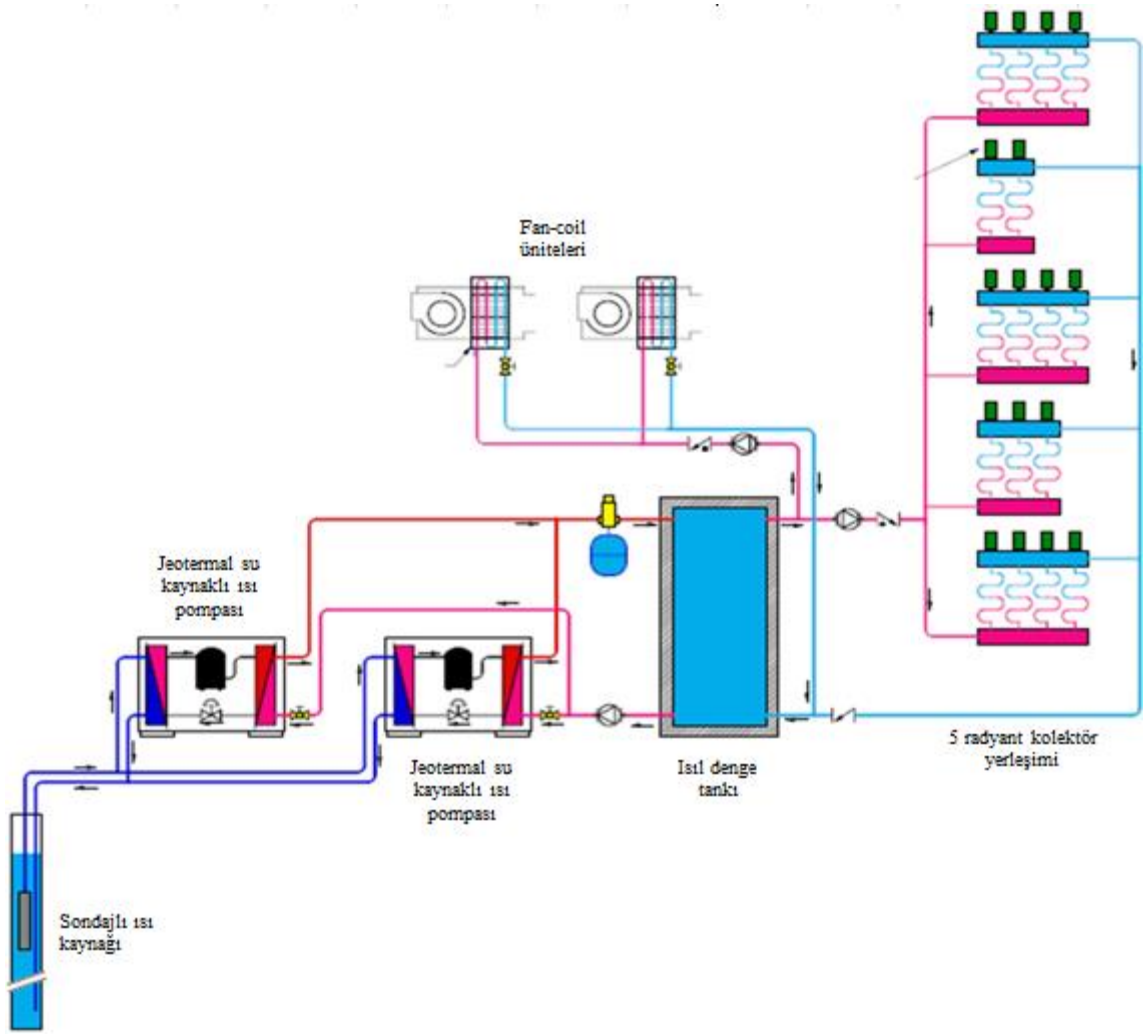
Termodinamik nedenlerle gidiş suyu sıcaklığını artıran bütün ilave tertibatlar, örneğin karışım vanaları ve ilave ısı değiştiricileri kullanılmamalıdır. Böylelikle ısı pompası minimum enerji tüketimi ile en uygun şekilde işletilebilir. [67]



Şekil 2.14 Yüzeyden ısıtma sistemi ile kullanım örneği [68]

2.3.3.2 Fan-Coil ile Kullanım

Hem ısıtma hem de soğutmanın eşit olarak kullanıldığı çok ılıman bölgelerde tercih edilebilir. Üfleme sesi nedeniyle rahatsız bir ev ortamı yaratılır. Isıtma için fan coil sistemi uygun değildir. Düşük COP değerleri, dolayısıyla yüksek enerji giderlerinin olduğu sistemdir. Isı pompaları çıkış sıcaklıkları genellikle 55C dir. Çıkış sıcaklığının artmasıyla enerji harcamaları artmaktadır. Yazlık evlerde, otellerde ve ofislerde kullanıldığında mantıklı bir çözümdür. Isı pompalarının en yüksek COP yani en az elektrik harcadığı çıkış suyu sıcaklığı 35C dir. Yani sistemlerin dizaynı buna göre yapılmalıdır. [69]



Şekil 2.15 Fan coil ile kullanım örneği [70]

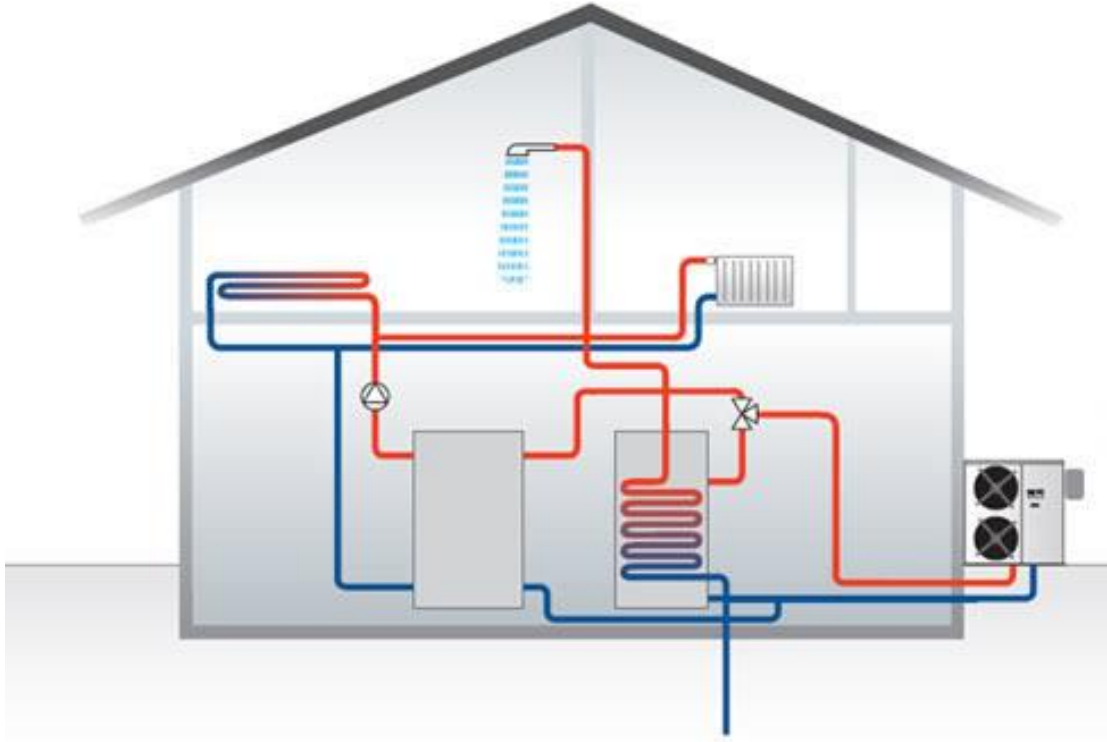
2.3.3.3 Radyatör ile Kullanım

Panel radyatör ile kullanım;

En düşük COP değerleri, dolayısıyla en yüksek enerji giderlerinin olduğu sistemdir. Isı pompaları çıkış sıcaklığı maksimum 55C dir. Çıkış sıcaklığının artmasıyla enerji harcamaları artmaktadır. Panel radyatörlü sistemlerde harcanacak elektrik yerden ısıtmaya nazaran %30-40 fazla olacaktır. COP değeri yerden ısıtmada(35 C) 4,5 olan ısı pompası radyatörlü sistemde (55 C)3,5 lara düşmektedir. Panel radyatörlü sistemlerde ısı pompası kullanımı işletme maliyeti en yüksek sistemdir. Güneş enerjisi ya da alternatif enerji kaynaklarının kullanımı nerdeyse imkansızdır.

Alüminyum radyatör ile kullanım;

Düşük COP değerleri, dolayısıyla yüksek enerji giderlerinin olduğu sistemdir. Isı pompaları çıkış sıcaklıkları genellikle 55-60 C dir. Çıkış sıcaklığının artmasıyla enerji harcamaları artmaktadır. Panel radyatörlü sistemlerde harcanacak elektrik yerden ısıtmaya nazaran %30-40 fazla olacaktır. COP değeri yerden ısıtmada(35 C) 4,5 olan ısı pompası radyatörlü sistemde (55 C)3,5 lara düşmektedir. Alüminyum radyatör hızlı tepki vermesi ve düşük sıcaklık korozyonu nedeniyle ısı pompasında tercih edilebilir fakat bu sıcaklık değerine göre dizayn edilmelidir. [71]



Şekil 2.16 Konvansiyonel sistemler ile kullanım örneği [72]

2.4 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Avantaj ve Dezavantajları

Dünyada yaşanan ekonomik sorunlarla ortaya çıkan enerji krizi ile enerjiyi verimli bir şekilde kullanmanın yolları aranmıştır. Alternatif enerji kaynakları arayışı

içerisindeki araştırmacılar, ısıtma ve soğutma amacıyla harcanan enerjinin ısı pompaları yardımıyla daha az tüketilebileceğini vurgulamaktadırlar.

Yerel hava kalitesine sağladığı katkı, tasarım esnekliği, enerji tasarrufu gibi etkenler ile tercih edilirken, yatırım maliyetlerinin yüksek olması, veriminin fazla sayıda etkene bağlı olması gibi nedenlerden dolayı uygulamaları kısıtlı kalmıştır. Aşağıda sistemin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde açıklanmıştır;

Sistemin avantajları;

- **Yüksek verim ve kararlılık kapasitesi:** TKIP sistemleri iyi tasarlandığı ve uygun bir şekilde kullanıldığından dolayı diğer sistemlere göre daha verimli ve ekonomik olarak daha iyi sonuçlar verir. Toprak kaynaklı ısı pompaları dış hava sıcaklıklarıyla fazla bağlantılı olmadığından kapasitelerinde kararlılık söz konusudur.
- **Konfor ve hava kalitesi:** TKIP sistemleri gizli soğutma etkilerini karşılamadan yüksek verim yakalayabilirler. Yüksek verimi yakalamanın bir başka yolu kompresörün basma basıncının, emme basıncına oranının azaltılmasıyla da elde edilir. Bu sonuç nem alma kapasitesini düşürerek konfor ve iç ortam hava kalitesine neden olmaktadır. Bu durumun yaşandığı yapılar genellikle ofisler ve büyük toplumsal binalarda rastlanılır.
- **Basit kontrol ekipmanları:** TKIP sistemlerinde konfor ve verimlilik değerlerinin kontrolünü yapan sistemlerinin kullanılmasına gerek yoktur. Çünkü ısı pompası sisteminin zaten büyük bir yatırım maliyeti vardır, birde bu sisteme ek olarak diğer kontrol ünitelerinin maliyetinin katılması iyi bir sonuç doğurmaz.
- **Düşük bakım maliyeti:** TKIP toprak altına yerleştirildiklerinden dolayı dış ortamdan etkilenecek bir sorun olmaz. Yani sistem iç ünite olarak yerleştirilmiştir.
- **Yardımcı ısıtmaya ihtiyaç yoktur:** TKIP sistemleri uygulandığı bölümün ısı ihtiyacını karşılayacak şekilde yapıldığından dolayı ek bir ısıya gerek duymaz.
- **Düşük kullanma sıcak suyu ısıtma maliyeti:** çoğu yapıda iç yüklerden dolayı ortaya çıkan fazla ısı söz konusudur. Bu ısı sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. Bu nedenle ısı kazanım serpantinleri kullanılmıştır.
- **Dış ünite ekipman olmaması:** dış ünite ekipman olmaması nedeniyle dışarıda yer işgal etmemektedir.

- **Paketlenmiş ekipman:** TKIP sistemleri paket halde bulunmaktadır. Bu yüzden bir kaçak olması, yanlış bağlantı gibi sorunlar söz konusu değildir.
- **Çevre dostu:** çevre kirliliği ve zararlı madde emülsiyonları düşüktür.
- **Mükemmel ömür ve döngü maliyeti:** TKIP sistemleri yüksek maliyetine karşılık 3 temel karakteristiğinden ötürü ömür ve döngü maliyeti açısından üstündür; düşük enerji, az bakım, uzun süre ekipman ömrü.
- **Tasarım Esnekliği:** Değişik boyut ve yerleşim şekillerinde tasarlanabilir. Isı pompaları, çatı arası boşluğa veya küçük mekanik odalara konulabilir. Yapıda oturanların veya zon yükleri değişince, ilave bir ekipman veya daha büyük ısı pompaları eklenebilir.

Sistemin dezavantajları;

- **Yüksek ilk yatırım maliyeti:** konutlardaki standart fiyatların iki katı daha fazlasına mal oluşları, ek işlemler maliyetin yüksek olmasına neden olmaktadır.
- **Performansın toprak altı borularına bağlı olması:** TKIP sistemleri verimliliği toprak altında bulunan ısı taşıyıcı borulara bağlıdır. Bu yüzden çok iyi bir tasarım söz konusu olmalıdır.
- **Ehliyetli tasarımcıların sınırlı sayıda olması:** TKIP sistemleriyle ilgilenen teknikerlerin sayıları dünya üzerinde sınırlı ülkemizde ise yok denecek kadar azdır. Bu yüzden müteahhitlerin yüksek maliyetten sorumlu tutulması ve bu işten uzak durmalarına neden olmaktadır. [73]

SAYISAL ÇÖZÜM

HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) yaklaşımı, akışkan ısı transferi, hareket vb. analizlerinin yapıldığı mühendislik sistemlerinin modellenmesi ve sayısal çözüm yöntemlerinin simülasyonu olarak tanımlanabilir.

HAD yaklaşımı ile çözüm metodu günümüzde birçok mühendislik probleminin sayısal çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Daha önceden pek çok anlaşılamayan akış özelliklerinin doğası, bu yöntemle anlaşılır hale gelmiştir. Ayrıca HAD tekniklerinin deneysel gözlemleri de, endüstride birçok uygulamalı mühendislik problemlerini de desteklemektedir.

HAD, nümerik yöntemleri kullanarak, non-lineer diferansiyel denklemlerin çözümünü yapmaktadır.

3.1 Akış ve Isı Transferi Denklemleri

Akışkanlar mekaniğinde ve ısı transferinde, akışkanın davranışını matematiksel olarak ifade eden korunum denklemlerinin temeli şu üç yasaya dayanır.

- Akışkan maddelerin akış miktarının, aktığı boru içinde korunarak taşınmasını tanımlayan bir denklemdir. Kütle, enerji, momentum, elektrik yükü ve diğer doğal miktarlarda kendi uygun koşullarda korunduğundan, çeşitli fiziksel olaylar süreklilik denklemi kullanılarak tarif edilebilir.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.1)$$

- Aynı hacim elemanı için; yüzeylerden geçen toplam momentum akısı, hacim içerisindeki momentumun zamanla değişimine eşittir. Bu aynı zamanda söz konusu hacme uygulanan net kuvvete eşittir. Bu, momentumun korunumu yasasıdır.

x-momentum denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) \right] \quad (3.2)$$

y-momentum denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y} \right) \right] \quad (3.3)$$

z-momentum denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = \\ -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial z} \right) \right] - \rho g \beta (T_\infty - T) \end{aligned} \quad (3.4)$$

- Hacim elemanının toplam enerjisindeki değişim, ısı transferi miktarındaki ve hacim elemanı üzerinde yapılan işteki değişimin toplamına eşittir. Bu da enerjinin korunumu yasasıdır.

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_p v T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p w T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + q''' \quad (3.5)$$

Burada z eksenini düşey eksen olarak alınmıştır. u,v,w sırasıyla x, y, z eksenlerdeki hız bileşenleridir (m/s). ρ yoğunluk (kg/m³), μ viskozite (Pa.s), β , havanın ısı genleşme katsayısı (K⁻¹), P basınç (Pa), T ise sıcaklıktır (K). Enerji denkleminde ise c_p özgül ısı (J/kgK), k ısı iletim katsayısıdır (W/mK).

3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğine Giriş

Bir HAD çalışmasında izlenilecek temel adımlar vardır. Bunlar;

- Analizin hedeflerinin belirlenmesi,
- Bilgisayar ortamında çözüm modelinin oluşturulması,
- Çözüm için sayısal ağ (mesh) oluşturulması,
- Analiz için fiziksel tanımların yapılması,
- Analizin çözdürülmesi,
- Sonuçların incelenmesi,

olarak sıralanabilir.

3.2.1 Analizin Hedeflerinin Belirlenmesi

Çalışma da öncelikle yapılacak analiz için hedefler, kabulleri belirlenir. Analiz çalışmalarında daha sonraki aşamalarda yapılacak çalışmalar bu kabuller çerçevesinde belirlenir.

3.2.2 Çözüm Modelinin Oluşturulması

Çalışmaya başlarken analizi yapılacak modelin uygun bir şekilde modellenmesi gerekir. Analizdeki temel kabuller, geometrik olarak ihmal edilebilecek noktalar, sayısal ağ kalitesini arttırmaya yönelik işlemler göz önüne alınarak model oluşturulur.

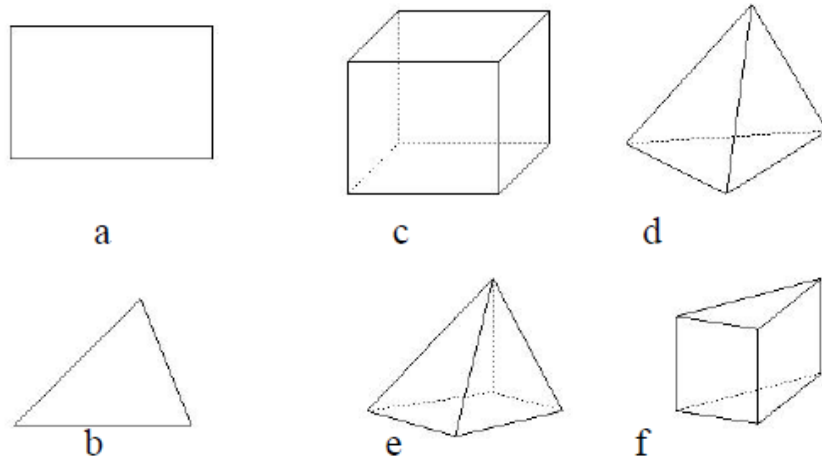
Oluşturulan model temel olarak analizi yapılacak bölgeleri temsil etmelidir. Örneğin akış modelleneyecek ise, akışkanın kapladığı bölge çizilmeliyken, incelen problem katı bir modelin ısı dağılımı incelenmesi ise bu katı model oluşturulmalıdır.

3.2.3 Ağ Yapısının Oluşturulması

HAD yazılımlarında temel mantık akışkan ve/veya katı modellerde kontrol hacimlerinin oluşturulması ile problemi yöneten denklemlerin bu hacimlerde çözdürülmesidir. Oluşturulan modelin üzerinde sonlu sayıda kontrol hacimlerinin oluşturulmasına matematiksel sayısal ağın oluşturulması denilir. Oluşturulan sayısal ağ özellikleri ile analiz sonucunun hassasiyeti ve doğruluğu direkt olarak ilintilidir.

Sayısal ağ oluşturulurken temel olarak kare ve üçgen geometrik şekillerinden yararlanılır. İki boyutlu ortamda kullanılan bu geometrilerden yararlanılarak üç boyutlu

ortama da geçiş yapılabilir. Şekil 3.1’de HAD yazılımlarında sayısal ağ oluşturmak için kullanılan başlıca elemanlar görülmektedir. Bu elemanlardan iki boyutlu modelleme için kare (a) ve üçgen (b) geometrileri kullanılır. Üç boyutlu sayısal ağ modellerinde ise kp (c), düzgün dört yüzlü (d), piramit (e), kama/prizma (f) geometrik elemanları kullanılır.



Şekil 3.1 HAD yazılımlarında kullanılan başlıca eleman tipleri

Oluşturulan sayısal ağ sayısı kontrol hacimlerini arttıracadıından dolayı çözümün doğruluğunu etkileyecektir. Ancak sayısal ağ sayısını arttırmak belli bir noktadan sonra analiz sonrası elde edilen sonuçlarda değişiklik göstermeyecektir. Bunun nedeni sayısal ağ miktarının artmasına rağmen, hesaplama platformu olan bilgisayardaki kesme ve yuvarlama hatalarıdır. Ayrıca sayısal ağ miktarının artması çözümü yapılan denklem matrisini de arttırmaktadır. Bu nedenle HAD çalışmalarında sayısal ağa duyarlılık denilen terime dikkat edilir. Buna göre, sayısal ağ miktarı farklı iki farklı analiz sonuçlarının istenilen toleransın altında olması koşuluyla çözümü hızlı olan model kabul edilir. Bu yöntem özellikle karşılaştırmalı tasarım geliştirme çalışmalarında yüksek işlevsellik sağlamaktadır.

Oluşturulan sayısal ağın çözüm hassasiyeti üzerine bir diğer etkisi de elemanların kalitesidir. Şekil 3.1’de görülen geometrik tanımların her birinin ideal durumdaki eleman kaliteleri bellidir. Buna göre, dörtgen elemanlar kare, üçgen elemanlar ise eşkenar üçgen olmak durumundadır. Oluşturulan elemanların ideal duruma göre bağlı

farkları eleman kalitesi olarak tanımlanmaktadır. Eleman çarpıklık oranı 3.6 denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$\theta_{skewness} = maks \left[\frac{\theta_{maks} - \theta_{ideal}}{180 - \theta_{ideal}}, \frac{\theta_{ideal} - \theta_{min}}{\theta_{ideal}} \right] \quad (3.6)$$

Denklemden yer alan θ_{maks} terimi, seçili model içerisindeki en büyük iç açısı, θ_{min} en küçük açısı, θ_{ideal} ise ideal iç açısı anlatmaktadır. Ağ kalitesi bu QEAS kriteri olarak adlandırılan değere göre kontrol edilmektedir. (Fluent,1998) QEAS değeri tüm elemanlar eşkenar ise 0'ı göstermekteyken, 1 değeri ise, bozulmuş ve kaba eleman yapısını anlatmaktadır. Sayısal ağın düzgünlüğü bu sayının 1'den küçük olması ile yorumlanabilir.

3.2.4 Analiz İçin Fiziksel Tanımlamaların Yapılması

Çalışmada bulunan HAD analizinde diferansiyel denklem sistemleri, oluşturulan sayısal ağ ile sonlu hacimlerde sayısal olarak çözülecektir. Bu durumda, malzeme özellikleri, sınır ve ortam şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Çalışmanın bu aşamasında çalışılan probleme ait tüm tanımlamalar yapılmalıdır.

3.2.5 Analizin Başlatılması

Problem sayısal analiz yazılımına uygun bir şekilde tanımlandıktan sonra bilgisayar ortamında çözdürülür. Çözümün doğruluğu ve hassasiyeti için probleme en uygun sayısal analiz metodu seçilir. Çözüm sırasında kullanılan denklemlerin yakınsamaları çeşitli monitörlerle kontrol edilir. Böylelikle problemin fiziğine en uygun sayısal ağ ve sayısal yöntemin tanımlanmış olduğuna kanaat getirilir.

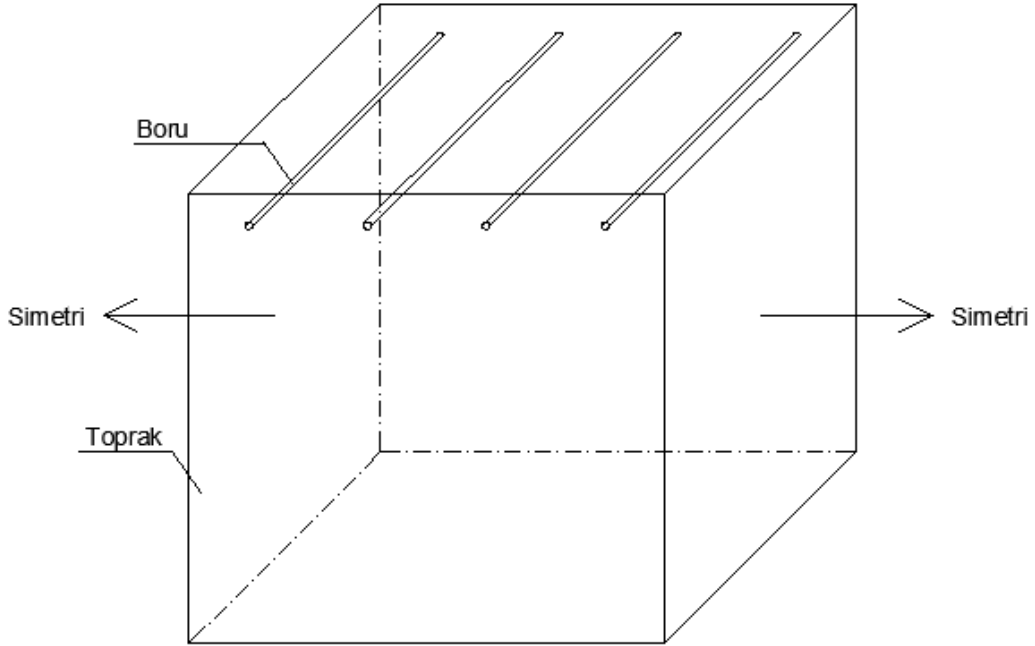
3.2.6 Sonuçların Değerlendirilmesi

Problem çözümünü takiben sonuçlar incelenir. Bunun için çeşitli metotlar vardır;

- Analiz monitörlerinden yakınsamanın kontrolü,
- Bulunan sayısal değerlerin problemin fiziğine aykırı olup olmadığı,
- Daha sık sayısal ağ ile elde edilen bir diğer sonucun ile karşılaştırılması

TOPRAK ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İÇİN ANALİZ ÇALIŞMALARI

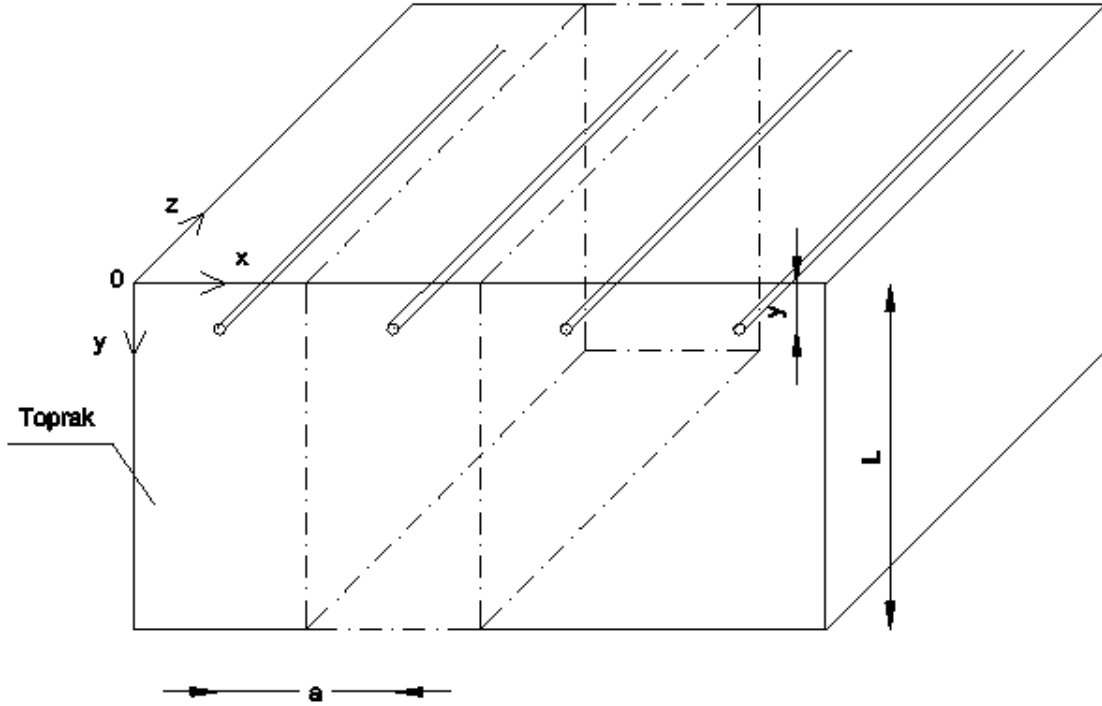
Çalışılan problem toprak içinde birbirinden belirli uzaklıklarda ve belirli bir derinliğe gömülü paralel borulardan oluşmaktadır. Çözüm bölgesi içerisinde oldukça fazla sayıda boru yer alması, en dışta kalan boruların sınırlandırılmış olmaları sebebi ile iç kısımlardaki boruların göz önüne alınarak analiz yapılması gereklidir. Aşağıdaki şekilde problemin çizimi yer almaktadır.



Şekil 4.1 Yatay borulu toprak kaynaklı ısı değıştirciler için genel model

4.1 Problemin Tanımı

Şekil 4.1’de verilen problemin çözüm bölgesini ele almak yerine simetri özelliğinden yararlanarak modeli küçültmek mümkündür.



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan kontrol hacminin seçimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi çalışmada kullanılan çözüm hacmi bir boruyu kapsamaktadır. Böylece model için atılacak mesh sayısı azaltılacak ve çözüm süresi de kısalmaktadır.

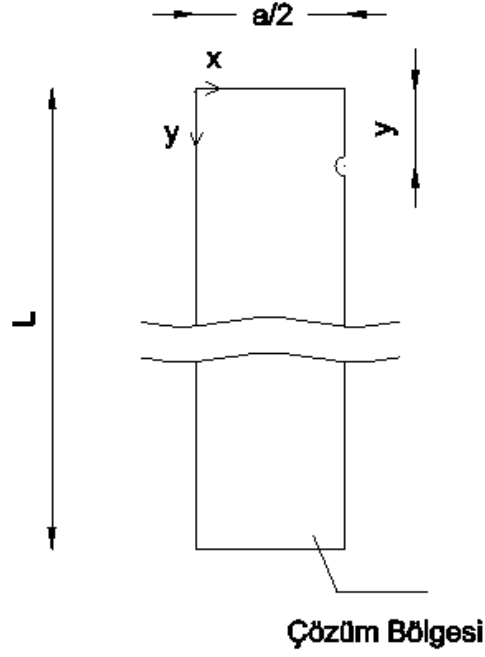
Burada;

a: Boru merkezleri arasındaki mesafe

y: Gömme derinliği

L: Modelin toplam derinliğini ifade etmektedir.

+z yönünde toprak sıcaklıkları değişmeyeceği için model 2 boyutlu hale getirilerek daha hızlı çözüm yapılabilir.



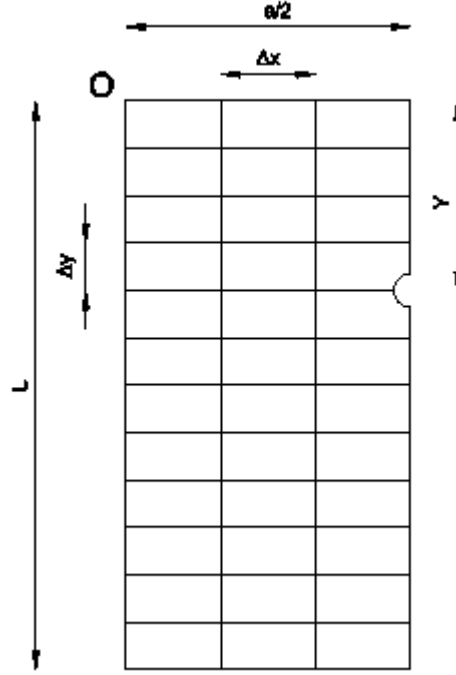
Şekil 4.3 Çalışmada kullanılan çözüm bölgesi

Çözüm bölgesi için iki boyutlu ısı iletimi denkleminin çözümü araştırılmıştır. Çözüm için yapılan kabuller aşağıdaki gibidir;

- Toprağın ısı özellikleri (ısı yayıcılık, ısı iletim katsayısı vb.) her noktada aynıdır ve yönden bağımsızdır,
- Boru malzemesi ve özellikleri her noktada aynıdır,
- Topraktaki kütle geçişi ve bunun etkisiyle oluşan ısı geçişi göz önüne alınmamıştır,

Toprak içerisinde iki boyutlu ve zamana bağlı ısı geçişi için aşağıdaki denklem kullanılacaktır.

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



Şekil 4.4 Çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı

Şekil 4.3’de ise çözüm bölgesinin bilgisayar modelindeki karşılığı görülmektedir. Çözüm bölgesi için sınır koşulları ise aşağıdaki gibidir;

$$T_0 = T(y, t) \quad , t = 0$$

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

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

$$Q_{top}, y = 0$$

$$Q_{alt yüzey} = 0, y = L$$

4.2 Toprak Sıcaklığının Zamana Ve Derinliğe Bağlı Değişimi

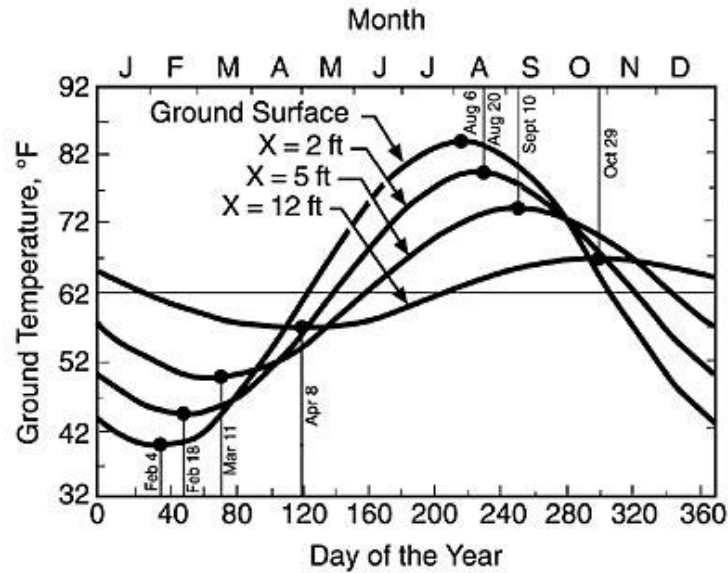
Isı kaynağı ve kuyusu olarak kullanılacak toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin bilinmesi için kartezyen koordinatlarda tek boyutlu periyodik ısı geçişini incelememiz gerekir.

Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin belirlenebilmesi için toprak yüzeyindeki günlük sıcaklık değişimlerinin bilinmesi gerekir. Yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişimini deneysel olarak ölçümü yapan kuruluştan elde edebilmek mümkündür.

Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı değişimi literatürde aşağıdaki denklem ile verilmiştir [74];

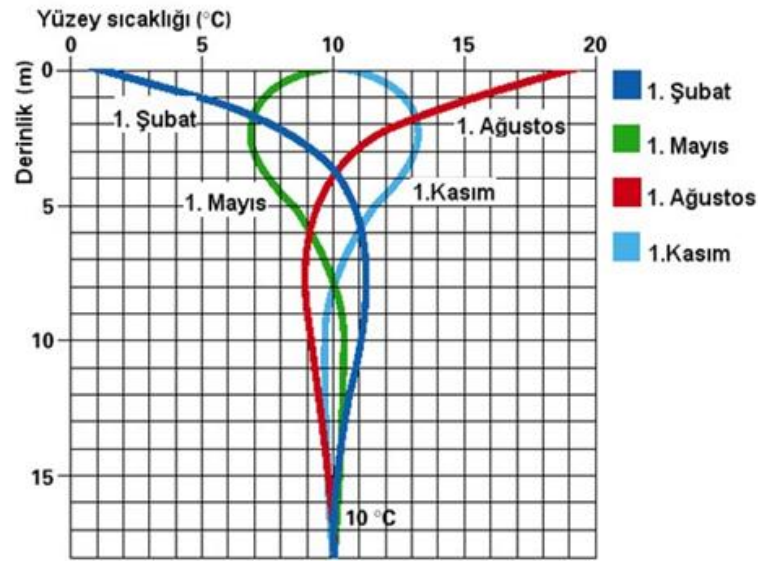
$$T(y, t) = T_{t,ort} + T_{t,gen} * e^{-y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}}} * \cos(2\pi\frac{t}{P} - y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}}) \quad (4.2)$$

İklim koşulları nedeni ile toprak sıcaklığı sezonsal dalgalanmalar göstermektedir. 4.2 denkleminin kullanılması ile farklı derinlikler için elde edilecek toprak sıcaklıkları Şekil 4.4'deki gibi olacaktır. Denklemde yer alan $T_{t,gen}$ değeri belirli bir derinlikten sonra 0 değerini alacaktır. Bu durumda belirli bir derinlikten sonra toprak sıcaklığı $T_{t,ort}$ değerine eşit olacaktır.



Şekil 4.5 Toprağın farklı derinliklerdeki zamana bağlı sıcaklık değişimi

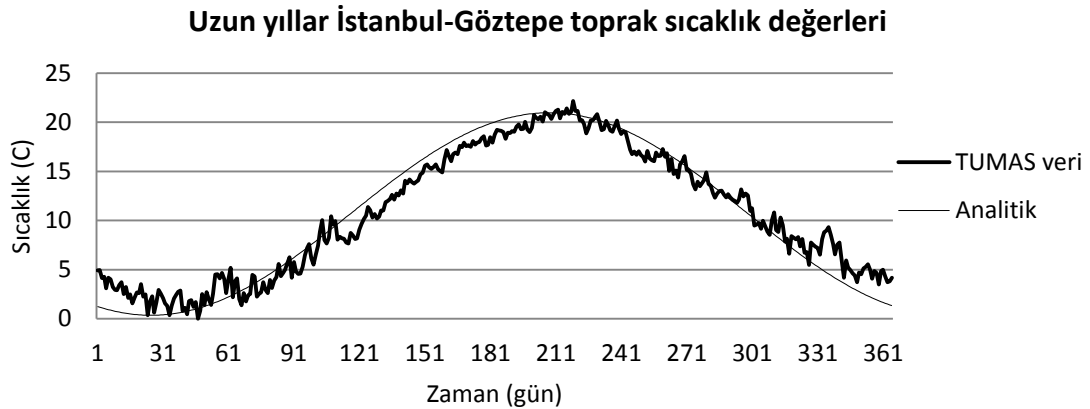
Başka bir gösterimle anlatmak gerekirse, literatürde farklı mevsimlerden seçilen bir gün için derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Farklı mevsimlerdeki sıcaklık değişimleri

Toprak yüzey koşulları ne olursa olsun, belirli bir derinlikten sonra sıcaklık sabit kalacaktır.

4.2 denkleminin katsayılarını belirleyebilmek için İstanbul şartlarındaki yüzey toprak sıcaklıkları bilinmelidir. Bu çalışma da kullanılan değerler TUMAS'dan elde edilmiştir.



Şekil 4.7 İstanbul için yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişimi

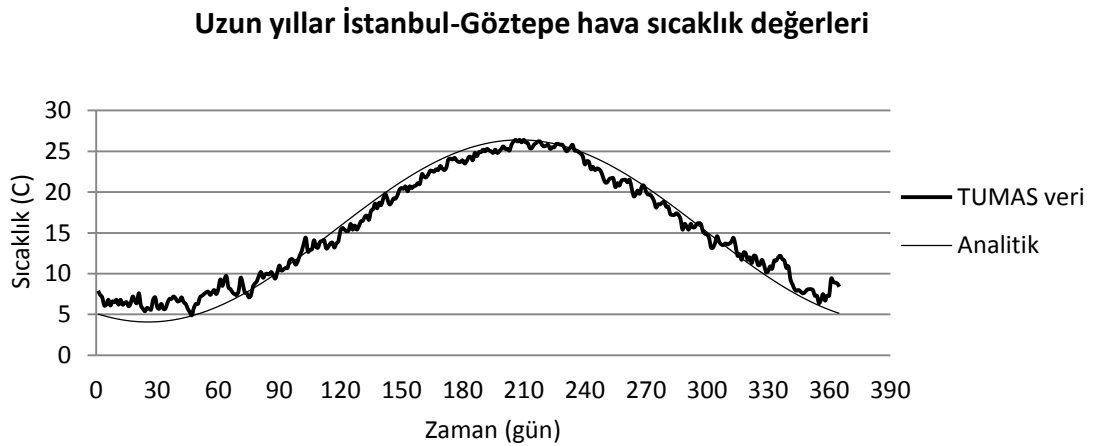
Hesaplamalarda $T_{t,ort}$ değeri 10,66 °C olup, $T_{t,gen}$ değeri 10,3 °C dır. Periyot başlangıcı olarak 1 Ocak seçilmiştir. Toprağın ısıl yayıcılığı 0,000000303 m²/s olup, gömme derinliği ise 1,5 m dir.

4.3 Hava Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi

Toprak sıcaklığının zamana bağlı değişiminin yanısıra dış hava sıcaklığının zamana bağlı değişiminin de analize eklenmesi gerekmektedir. Literatüre bakıldığında dış hava sıcaklığının değişiminin aşağıdaki formül ile hesaplandığı görülmüştür [75];

$$T_{yüzey} = T_{h,ort} + T_{h,gen} * \cos(2\pi \frac{t}{p}) \quad (4.3)$$

Bu denklemin katsayılarını belirlemek için uzun yıllar ortalama hava sıcaklık verileri TÜMAS'dan elde edilmiştir.

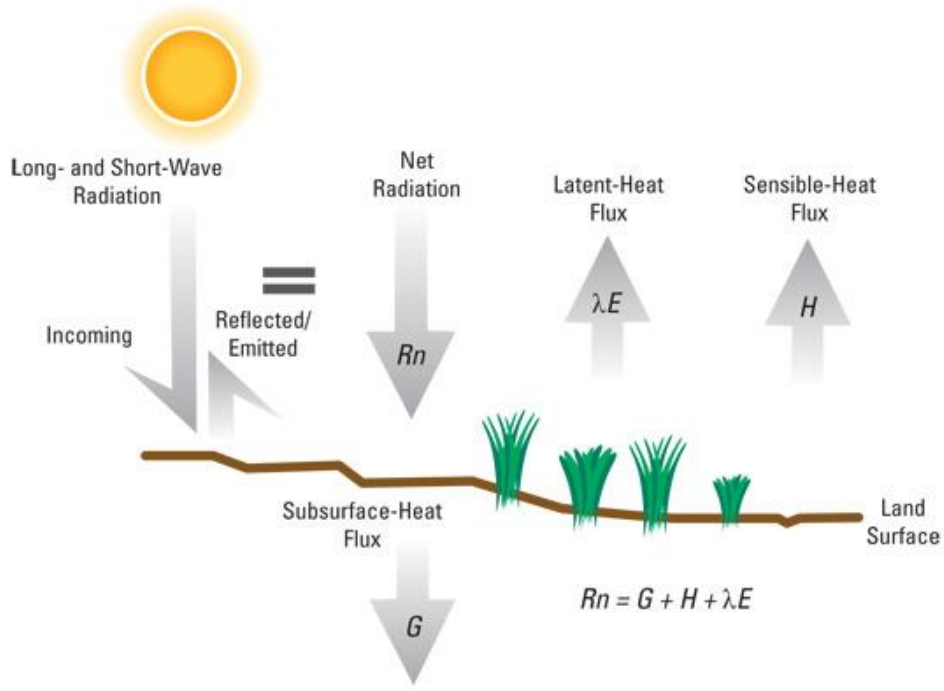


Şekil 4.8 Uzun yıllar İstanbul günlük sıcaklık değerleri

Alınan değerlere göre $T_{h,ort}$ değeri 15,33 °C, $T_{h,gen}$ değeri ise 11 °C olmaktadır. Periyot başlangıcı olarak 1 Ocak seçilmiş olup, periyot ise bir yıl olarak belirlenmiştir.

4.4 Üst Yüzeydeki Enerji Dengesi

Analize başlarken modelin üst yüzeyi için iklim koşullarını dikkate alınarak enerji dengesi kurulması gereklidir.



Şekil 4.9 Yüzeydeki enerji dengesi örneği [83]

Bu çalışma da üst yüzey için çalışılmış olan ısı transfer denklemlerini şu şekilde sıralayabiliriz; taşınım ile ısı geçişi, net güneş ışınımı, gelen ve giden uzun dalga ışınımı ve buharlaşma ile olan ısı transferi. Toprak yüzeyine gelen toplam ısı akısı, toprakta iletimle olacak ısı akısına eşit olacaktır.

Bu koşullar dikkate alınarak enerji dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$G = \dot{Q}_{\text{üst yüzey}} = \dot{Q}_{\text{taşınım}} + \dot{Q}_{\text{güneş}} + \dot{Q}_{\text{uzundalga}_y} + \dot{Q}_{\text{uzundalga}_g} + \dot{Q}_{\text{evap}} \quad (4.4)$$

4.4.1 Yüzeyden Taşınım ile Olan Duyulur Isı Transferi

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

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = \rho_h * c_p * D_h * \zeta * (T_h - T_{\text{yüzey}}) \quad (4.5)$$

$$D_h = \frac{\kappa^2 * U_z}{(\ln(\frac{z}{z_0}))^2} \quad (4.6)$$

$$\zeta = \frac{1}{(1 + 10 * Ri)} \quad (4.7)$$

$$Ri = \frac{g * z * (T_h - T_y)}{T_h * U_z^2} \quad (4.8)$$

4.4.2 Yüzeyle Gelen Güneş Işınımı

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

$$\dot{Q}_{güneş} = b * S \quad (4.9)$$

Tam aydınlatılmış yüzeylerde b katsayısı;

$$b = 1 - albedo \quad (4.10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Albedo, ya da yansıtılabilirlik, yüzeyin yasıtıcılığını tanımlayan bir terimdir.

Toprak üst yüzeyi tarafından yutulan güneş ışınımı Fourier analizi ve birinci harmonik fonksiyon kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Cinquemani vd., 1979);

$$\dot{Q}_{güneş} = b * [S_{ort} + S_{gen} * Re(\exp(i\omega t + \varphi_1))] \quad (4.11)$$

Yüzeyin soğurduğu güneş ışınımı bulabilmek için, çalışılan bölgenin gün uzunluğu bilgisine ihtiyaç vardır. Gün uzunluğunun hesaplanması için coğrafi bölgeye ait enlem, boylam ve deniz seviyesinden yüksekliğinin bilinmesi gereklidir. Ayrıca coğrafi konumun hangi zaman dilimi içinde bulunduğunun da bilinmesi gereklidir.

Güneşin doğuşu ve batışını saat ve dakika olarak bulmak için aşağıdaki eşitliklerden yararlanabiliriz (Ahmed, 1996). Güneşin doğuşu için;

$$GD = Z - U \quad (4.12)$$

Güneşin batışı için;

$$GB = Z + U \quad (4.13)$$

eşitlikleri kullanılabilir.

$$Z = 12 + \frac{(R-L)}{15} + \frac{T}{60} \quad (4.14)$$

$$U = \frac{1}{15} \arccos \left\{ \frac{[\sin(-0.8333 - 0.0347(H)^{0.5}) - \sin D * \sin B]}{\cos D * \cos B} \right\} \quad (4.15)$$

$$T = 3,98892 * [(\varepsilon - \beta) + (\lambda - \nu)] \quad (4.16)$$

$$\lambda = 0,985653 * (N - 2) \quad (4.17)$$

$$\nu = \lambda + 1,915169 * \sin\lambda \quad (4.18)$$

$$\varepsilon = 0,985653 * (N - 80) \quad \begin{cases} \varepsilon \geq 270; \varepsilon - 360; \\ \varepsilon \geq 90; \varepsilon - 90; \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\beta = \arctan(0,917408 * \tan\varepsilon) \quad (4.20)$$

$$D = \arcsin(0,398 * \sin(\nu - 78,75)) \quad (4.21)$$

4.4.3 Yüzeyden Yayılan Uzun Dalga Işınımı

Toprak üst yüzeyinden yayılan uzun dalga ışıınımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\dot{Q}_{uzundalga_y} = -\varepsilon * \sigma * T_y^4 \quad (4.22)$$

4.4.4 Yüzeğe Gelen Uzun Dalga Işınımı

Yüzeğe gelen uzun dalga ışıınımı ampirik ifadelerle verilmiştir (Satterlund, 1979; Fleagle ve Businger, 1980);

$$\dot{Q}_{uzundalga_g} = 1,08 * \left[1 - \exp\left(- (0,01 * e_h)^{\frac{T_h}{2016}}\right) \right] * \sigma * T_h^4 \quad (4.23)$$

$$e_h = 10^{(11,40 - \left(\frac{2553}{T_{min,ay}}\right))} \quad (4.24)$$

4.4.5 Yüzeyden Evaporasyon ile Gizli Isı Transferi

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

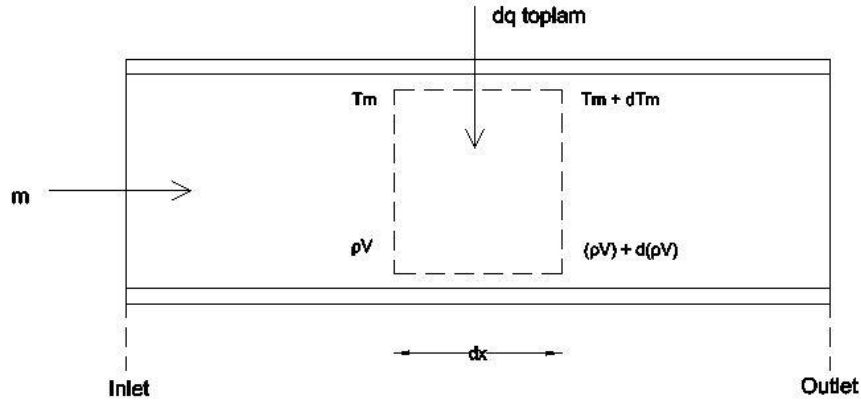
$$\dot{Q}_{evap} = 0,0168 * f * h * [(aT_{surface} + b) - r_h(aT_h + b)] \quad (4.25)$$

4.5 Su Boyunca Sıcaklık Değişimi

Boru içindeki suyun sıcaklık değişimi aşağıdaki denklemler ile olmaktadır;

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{\dot{u}} - \dot{E}_{\dot{ç}} = \frac{dE_{sistem}}{dt} \quad (4.26)$$

Kontrol hacmi Şekil 4.8'deki gibi seçildiğinde;



Şekil 4.10 Hesaplar için seçilen kontrol hacmi

$$dq_{toplam} + \dot{m}(c_v T_m + pV) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pV) + \dot{m} \frac{d(T_m + pV)}{dx} \right] = 0 \quad (4.27)$$

$$dq_{toplam} = \dot{m} * d(c_v T_m + pV) \quad (4.28)$$

Eğer akışkan ideal gaz olarak kabul edilirse;

$$c_v = c_p - R \quad (4.29)$$

$$p = RT_m \quad (4.30)$$

Bu durumda;

$$dq_{toplam} = \dot{m} c_p dT_m = \dot{q} P dx \quad (4.31)$$

Newton'un soğuma kanununa göre;

$$\dot{q}_s = h * (T_s - T_m) \quad (4.32)$$

(4.30) ve (4.31) birlikte kullanıldığında;

$$\frac{dq_{toplam}}{dq_{toplam}} = \frac{\dot{m} c_p dT_m}{\dot{q} P dx} \quad (4.33)$$

Bu denkleme Newton'un soğuma kanunu eklendiğinde;

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{\dot{q} P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} [h(T_{yüzey} - T_m)] \quad (4.34)$$

Yüzey sıcaklığı ile ortalama sıcaklık arasındaki farka, $T_{yüzey} - T_m$, ΔT denildiğinde ve T_m sabit olarak kabul edildiğinde;

$$dT_m = d(T_{yüzey} - T_m) = -d\Delta T \quad (4.35)$$

Giriş ve çıkış koşulları için integral alınırsa;

$$\int_{\Delta T_{giriş}}^{\Delta T_{çıkış}} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m}c_p} \int_0^L h dx \quad (4.36)$$

$$\ln \frac{\Delta T_{çıkış}}{\Delta T_{giriş}} = -\frac{PLh}{\dot{m}c_p} \quad (4.37)$$

$$\frac{\Delta T_{çıkış}}{\Delta T_{giriş}} = \frac{T_{yüzey} - T_{çıkış}}{T_{yüzey} - T_{giriş}} = \exp\left(-\frac{PLh}{\dot{m}c_p}\right) \quad (4.38)$$

Suyun çıkış sıcaklığı aşağıdaki denklem ile bulunabilir;

$$T_{çıkış} = T_{yüzey} + (T_{yüzey} - T_{giriş}) * \exp\left(-\frac{PLh}{\dot{m}c_p}\right) \quad (4.39)$$

Topraktan çekilen/toprağa atılan ısıyı bulmak için aşağıdaki denklemleri kullanmak gerekmektedir;

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{çıkış} - \Delta T_{giriş}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{çıkış}}{\Delta T_{giriş}}\right)} \quad (4.40)$$

$$q = h * A_s * \Delta T_{lm} \quad (4.41)$$

4.6 CFD Ortamında Problemin Modellenmesi ve Çözümü

Analize başlarken çözülecek problemin akış türünün belirlenmesi gerekmektedir.

Kullanılan parametreler aşağıda yer almaktadır;

Çizelge 4.1 Akış türünü belirlemek için kullanılan parametreler

V	0,2	m/s	Su hızı
D	2,48E-02	m	Boru iç çapı
ρ	1000	kg/m ³	Su yoğunluğu
μ	1,54E-03	Ns/m ²	Dinamik viskozite
m	0,0966	kg/s	Debi

Akış türünün belirlenmesi Reynold sayısının kontrolü ile yapılmaktadır;

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.42)$$

Reynold sayısı bu hesaplama göre 3230 olarak hesaplanmıştır. $4000 > Re > 2300$ olduğu için akış geçiş bölgesindedir.

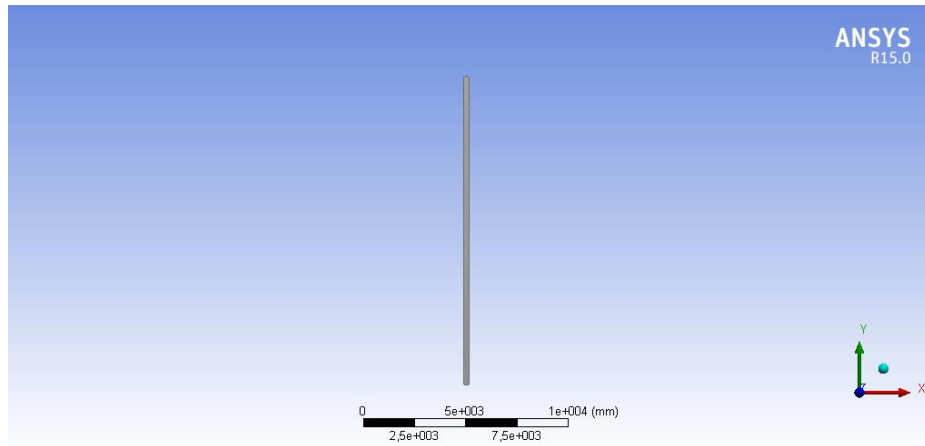
Hesaplamalar için kullanılan parametreler ve değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir;

Çizelge 4.2 Analizde kullanılan parametreler

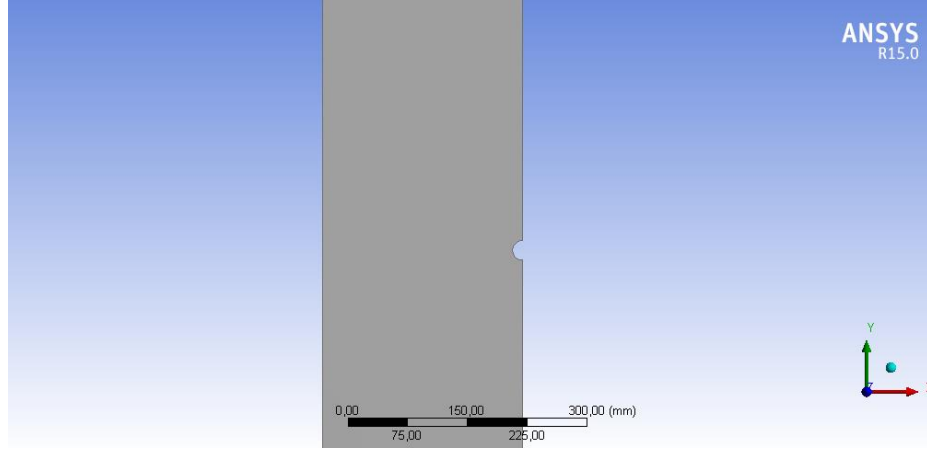
Pr	11,41	
cp	4204,5	
k	5,51E-01	W/m K
f	1,98E-02	
A	7,79E-01	m ²
Re	3,23E+03	
m	0,096610257	kg/s
Nu	3,36	
h	74,6516129	W/m ² K

4.6.1 Geometri

Şekil 4.3’de verilen çözüm bölgesinin analizine başlamak için geometrisi çizilmelidir. Fluent programı içerisinde yer alan Workbench içerisinde geometri 0.25m x 15m lik 2 boyutlu model oluşturulmuştur.



Şekil 4.11 İki boyutlu çözüm bölgesi



Şekil 4.12 İki boyutlu çözüm bölgesinde boru detayı

Oluşturulan hacimde Şekil 4.11’den görüleceği gibi sadece toprak hacmi vardır. Sistemde ısı transferini sağlayacak önemli birim olan boru ve su hacimleri modellenmemiştir. Model de akışkan hacmi yer aldığı zaman analize başlanırken zaman adımı değeri oldukça küçük verilmelidir. Bu değer Courant sayısı ile değerlendirilmektedir;

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq C_{maks} \quad (4.43)$$

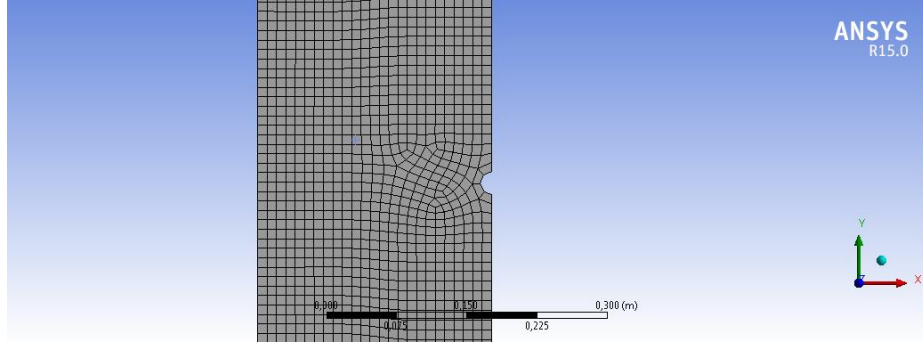
Burada u değeri, akışkan hızını (m/s), Δt değeri zaman adımını (s) ise Δx ise uzunluğu (m) belirtmektedir. Buna göre yapılan analizin doğru olabilmesi için Courant sayısının 1’den küçük olması gerekmektedir.

Ayrıca boru ve su hacmi eklendiğinde modele atılacak mesh sayısının da fazla olacağı, bunun sonucunda analiz zamanının da artacağı da göz önüne alınarak boru ve su hacmi modellenmemiştir.

4.6.2 Ağ Yapısı

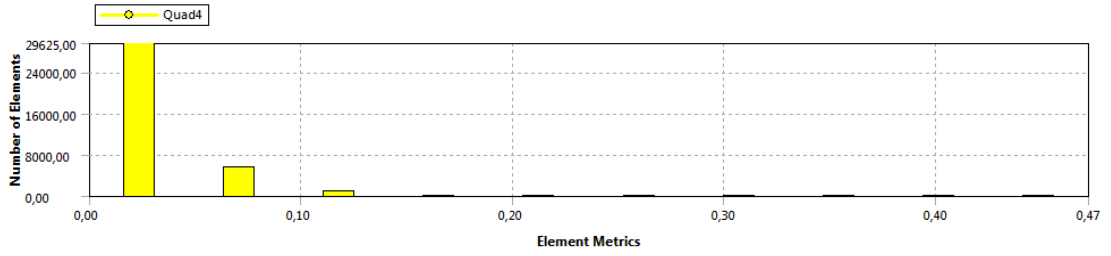
Doğru sonuçlara ulaşabilmek için hazırlanan çözüm alanının uygun sayıda sonlu elemana bölünmesi gerekmektedir. Analiz için hazırlanan sayısal ağ Fluent içerisinde yer alan Mesh bölümü ile oluşturulmuştur. Sadece ısı transferi çözüleceği için “face sizing” ile mesh atılmıştır. Çarpıklık değerine göre “element size” değiştirilmiştir.

Oluşturulan mesh yapısı Şekil 4.14 görülmektedir;

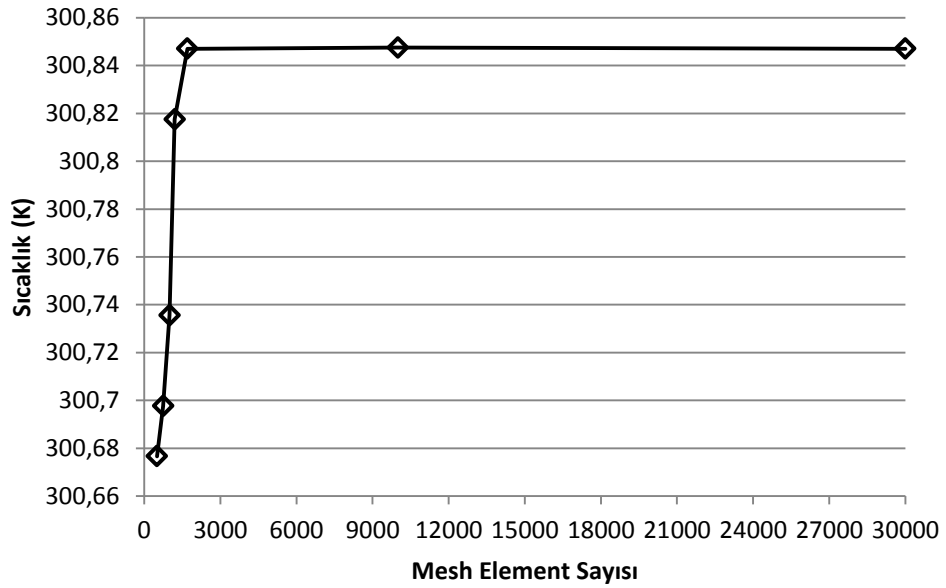


Şekil 4.13 Oluşturulan mesh yapısı

Bu model ile element sayısı 1656, node sayısı 1975 dır. Oluşturulan ağın çarpıklık oranı en fazla 0.47 dir. Bu değer daha önce bahsedildiği gibi 1'den oldukça küçük olduğu için mesh yapısının modele uygun olduğu söylenebilir. Mesh bağımsızlığı çalışması ile de element sayısının uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.14 Mesh düzgünlüğü (skewness)



Şekil 4.15 Mesh Bağımsızlığı

4.6.3 İsimlendirmeler

Oluşturulan model de sınır koşullarının verilebilmesi için yüzeylere isimlendirme yapılması gerekmektedir. Modelin üst kısmı “top”, alt kısmı “bottom”, borunun olduğu kısım “soil2hdpe” olarak isimlendirilmiştir.

4.6.4 Analiz

İsimlendirmesi yapılan model, zamana bağlı (transient) çözülecektir. Analize başlarken enerji bölümü açılmıştır. Sadece toprak modellendiği için akış laminar olarak seçilmiştir.

Konuya ait literatür taraması yapıldığında akışkan içermeyen modellerin time step değerinin 3600 s olarak verildiği görülmüştür. [76, 77, 78, 79, 80, 81]

4.6.4.1 Malzemelerin Tanımlanması

Analizin yapılacağı geometride yer alan toprak ile ilgili özellikler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.3 Analizde için kullanılan toprağın özellikleri

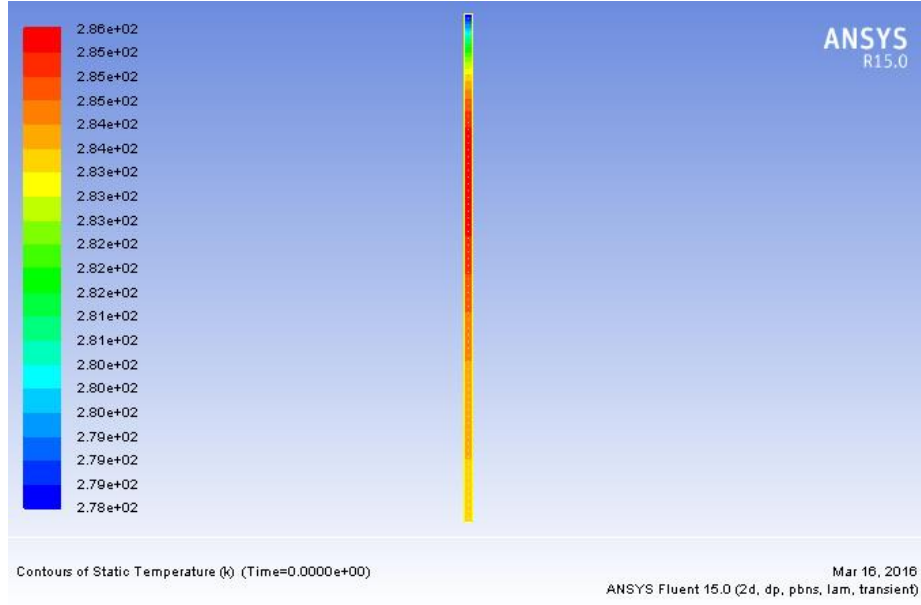
Isı İletim Katsayısı (k)	1,274 W/mK
Yoğunluk (ρ)	1360 kg/m ³
Özgül ısı (c _p)	800 J/kgK

4.6.4.2 Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

(4.2) denklemi t=0 için revize edildiğinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir;

$$T(y) = 283,81 + 10,3 * e^{-0,29168*y} * \cos(2.159373 - 0,29168 * y) \quad (4.44)$$

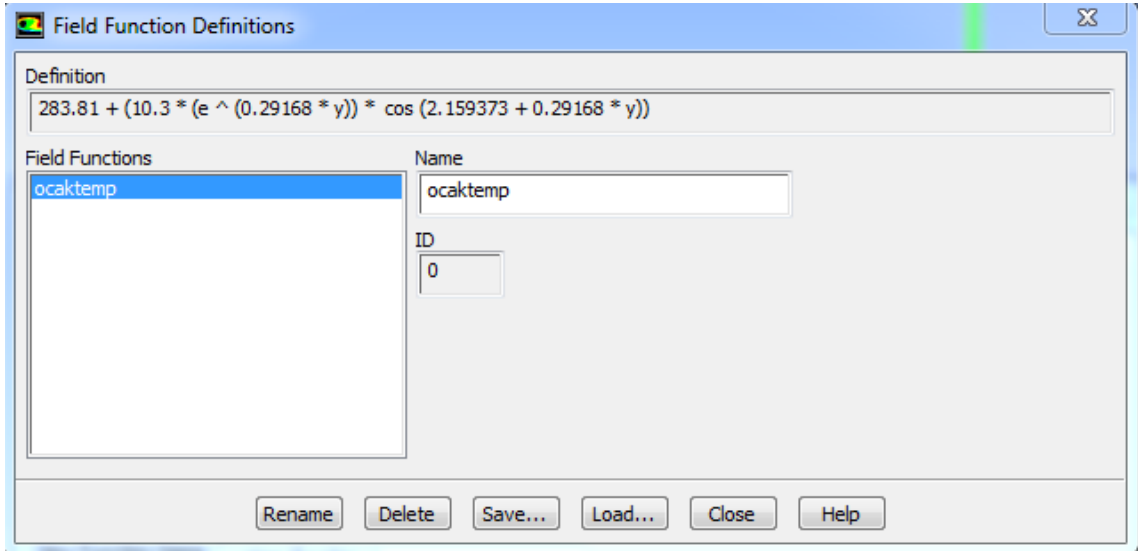
Denklem modele okutulduğunda, 1 Ocak için model de derinliğe bağlı sıcaklık dağılımı elde edilmektedir;



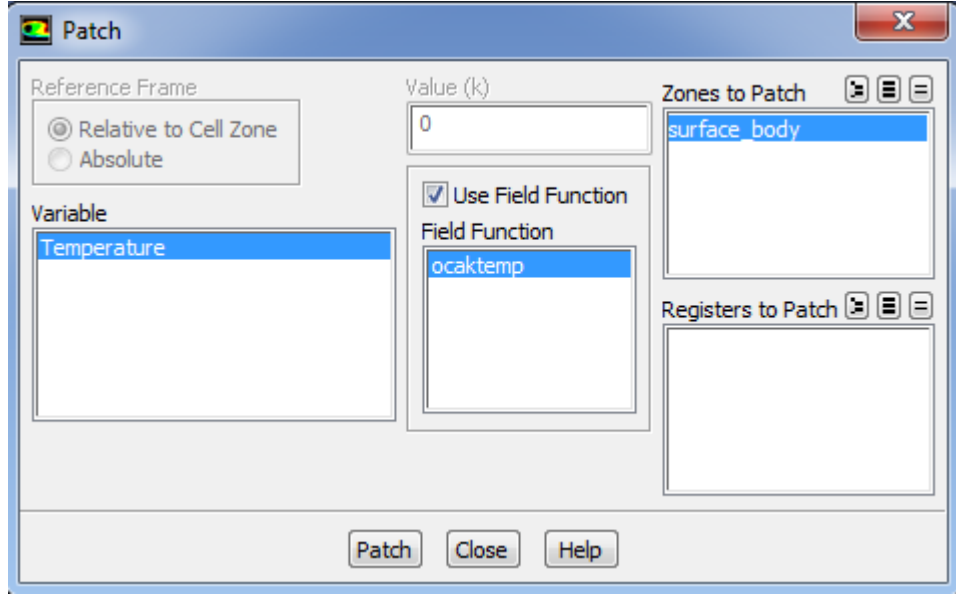
Şekil 4.16 Başlangıç koşulu için toprak sıcaklığının derinliğe göre değişimi

4.6.4.3 Sınır Koşullarının Girilmesi

Başlangıç koşulu girildikten sonra, isimlendirmesi yapılan bölümler için sınır koşullarının girilmesi gereklidir. $t=0$ anı için modele toprak sıcaklığı okutulduğunda toprak yüzey sıcaklığı okutulan değer olarak alınmaktadır.



Şekil 4.17 Custom Field Function olarak toprak sıcaklık denkleminin eklenmesi

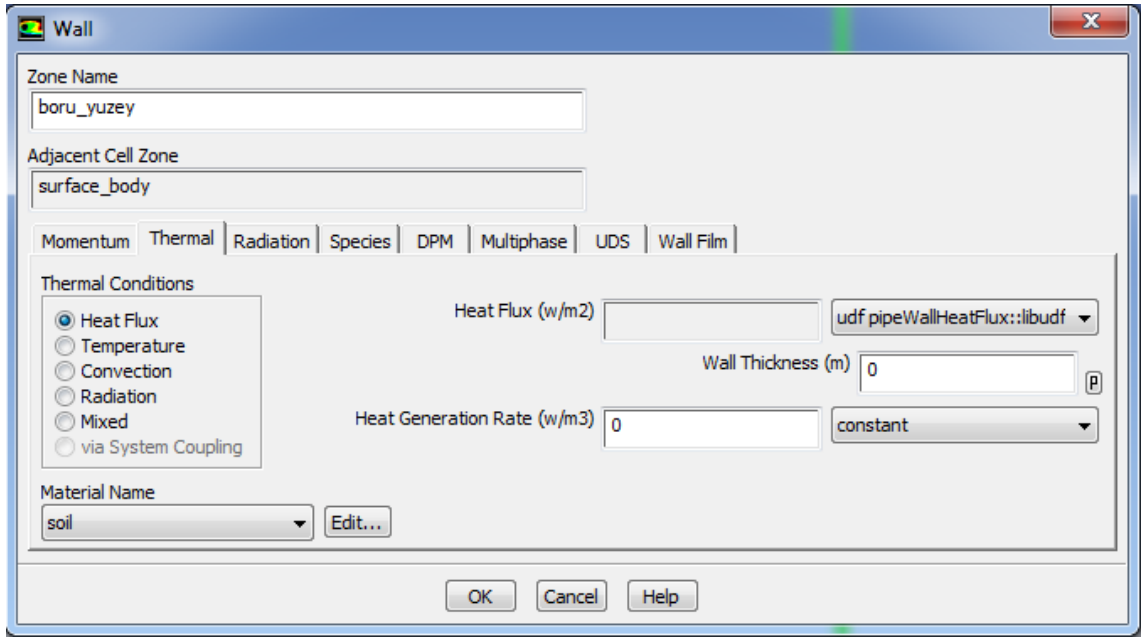


Şekil 4.18 Eklenen Custom Field Funtion'ın modele eklenmesi

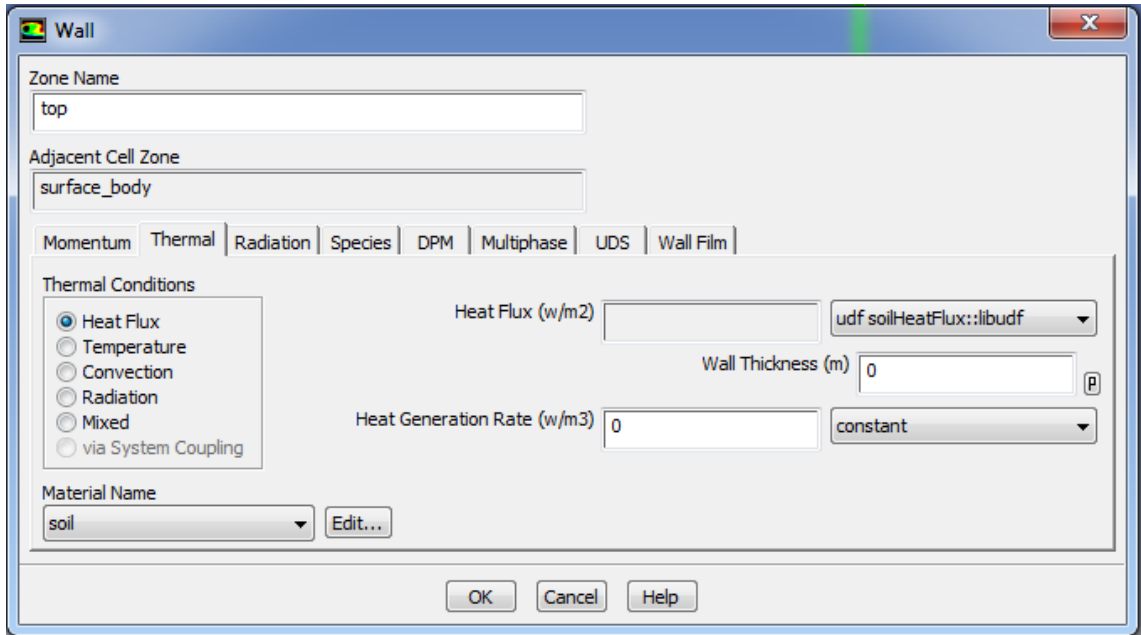
Ancak analiz devam ederken İstanbul iklim şartlarını Bölüm 4.4'de anlatıldığı şekilde modele okutabilmek için C kodu yazılarak “User Defined Function” olarak analizde kullanılmıştır. Suyun borudan çıkış sıcaklığı, toprağın çektiği/toprağa atılan ısı akısı gibi değerler bu şekilde hesaplanmaktadır.

Yazılan UDF'in çözüm mantığı aşağıda yer alan akış şemasında anlatılmaktadır. Buna göre, UDF ile, “soil2hdpe” yüzeyindeki sıcaklıklar hesaplandıktan sonra su çıkış sıcaklığı bulunmaktadır. Yine topraktan çekilen/toprağa atılan ısı akısı UDF içerisinde hesaplatılarak, “soil2hdpe” olarak isimlendirilen bölüme sınır şartı olarak verilmektedir.

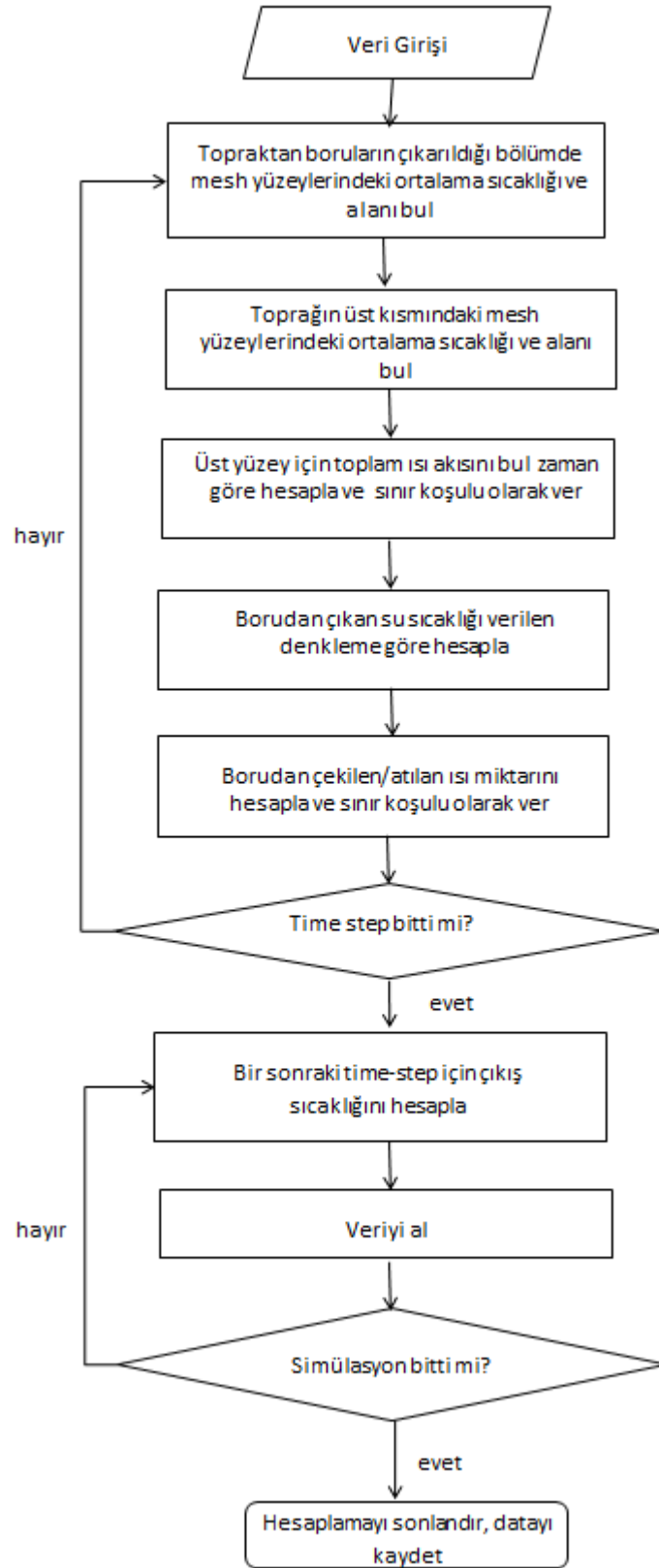
Bölüm 4.4'de analitik denklemleri verilen toplam ısı akısı UDF içerisinde hesaplanarak “top” olarak isimlendirilen bölüme sınır koşulu olarak verilmektedir.



Şekil 4.19 Borunun çıkartıldığı kısma ısı akısı olarak UDF verilmesi



Şekil 4.20 Toprağın üst kısma ısı akısı olarak UDF'in verilmesi



Şekil 4.21 Analiz için yazılmış UDF'in çözüm mantığı

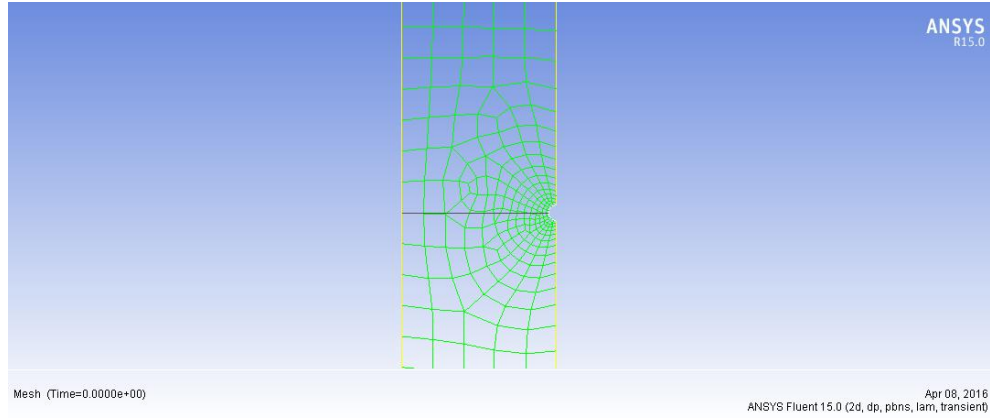
4.6.5 Optimize Edilecek Şartlar

Oluşturulan model için İstanbul iklim şartları için boru derinliği ve boru aralıklarında sistemin performans değişimi hesaplanacaktır.

4.7 Sonuçlar

Analiz 1 Ocak 00:00'da başlamış olup, 1 yıl boyunca devam ettirilmiştir. Toprağın üst kısmına sınır koşulu ile verilen farklı ısı akıları ve boru kısmından çekilen/atılan ısılar incelenmiştir. Toprak yüzeyine tüm yıl verilen ısı akıları ile değişen yüzey sıcaklığı ile çekilen/atılan yüzeydeki sıcaklık değişimleri incelenmiştir.

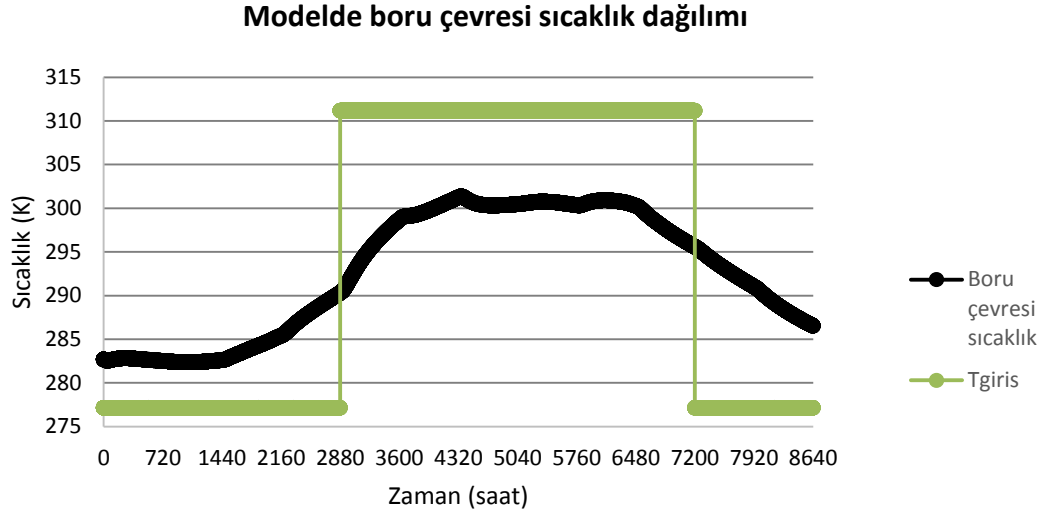
Modeldeki sonuçları karşılaştırmak için boru yakınında, -1.5m de çizgi oluşturulmuştur.



Şekil 4.22 Sonuçları karşılaştırmak için alınan çizgi

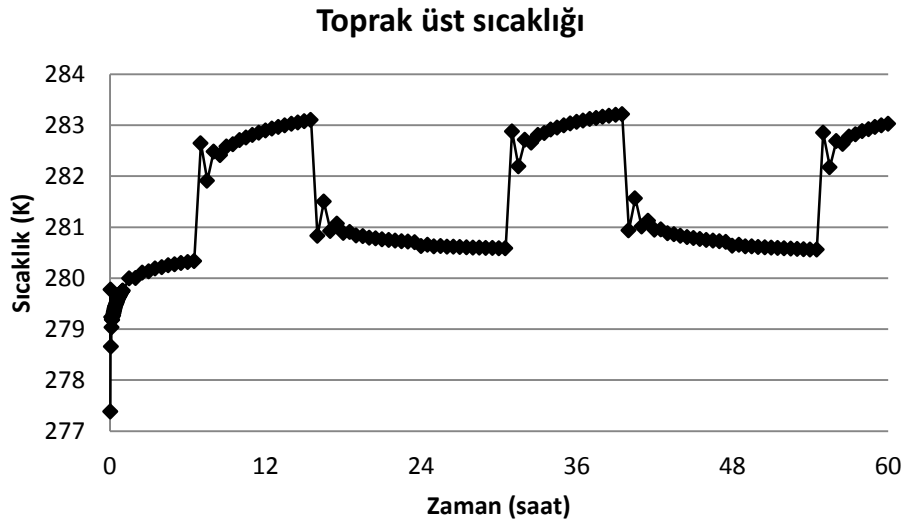
Yazılan UDF'de analiz ısıtma ve soğutma sezonu olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Kasım-Mart ayları arası ısıtma, Mayıs-Eylül ayları arası ise soğutma sezonu olarak kabul edilmiştir.

Isıtma ve soğutma yapılmadan önce toprak borusuz olarak modellenmiş ve 1.5 m lik gömme derinliğinde yıllık toprak sıcaklık değerleri bulunmuştur. Ve bu verilere bakılarak ısıtma sezonu için su giriş sıcaklığı 277.15 K, soğutma mevsiminde 311.15 K olmasına karar verilmiştir;



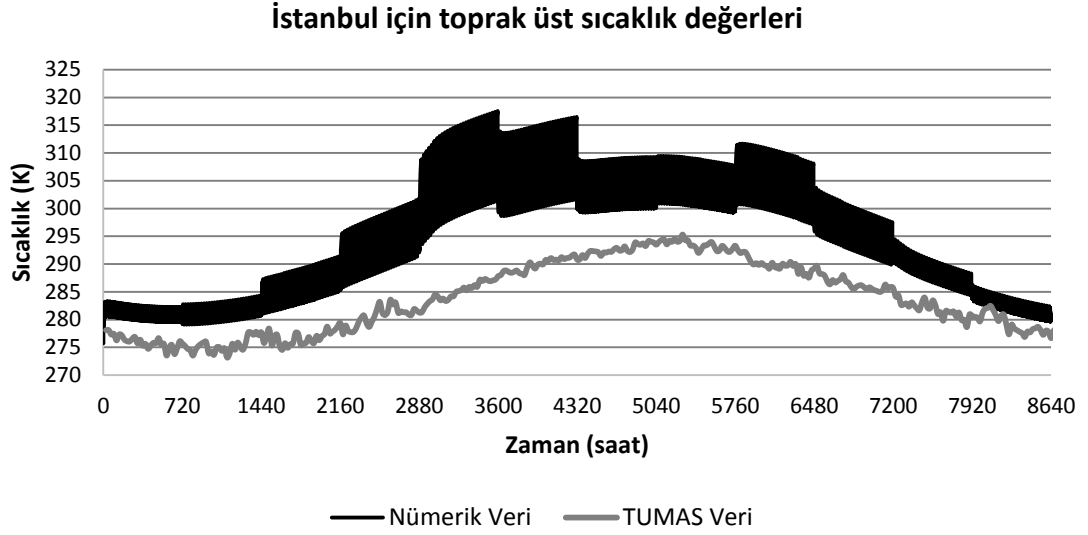
Şekil 4.23 Oluşturulan modelde 1,5mdeki sıcaklık değerleri ve su giriş sıcaklıkları

Toprağın üst kısmı için yazılan C kodu, sınır koşulu olarak modele verildiğinde toprak yüzey sıcaklığının değişimi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde analiz 3. gününü yansıtmaktadır;



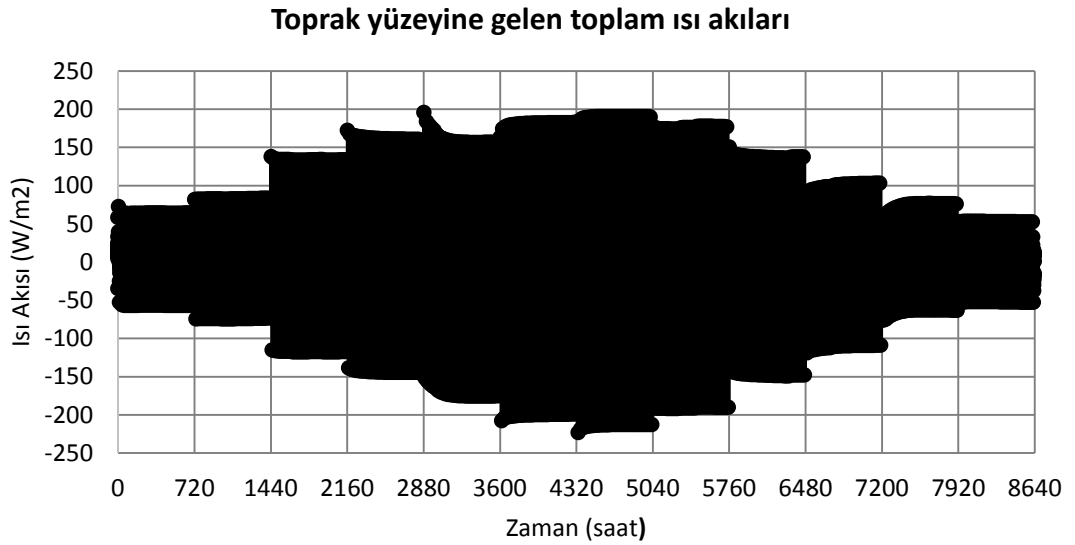
Şekil 4.24 Güneş radyasyonu eklendiğinde toprak sıcaklığındaki değişim

Üst yüzeye gelen ısı akısı zaman bağlı değiştiği için toprak sıcaklığı da buna bağlı olarak değişmektedir. C kodunda her ay 30 gün kabul edilmektedir. Buna göre bir yıl için 8640 saatlik veri alınmıştır. İstanbul için yıllık toprak üst sıcaklık değerleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.25 İstanbul için yıllık toprak üst sıcaklık değerleri

Toprak yüzeyindeki enerji dengesi bölüm 4.4’de detaylı olarak açıklanmıştır. Buna göre zaman ve yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak toprak yüzeyindeki ısı akısı değişmektedir;



Şekil 4.26 İstanbul için toprak yüzeyine gelen toplam ısı akıları

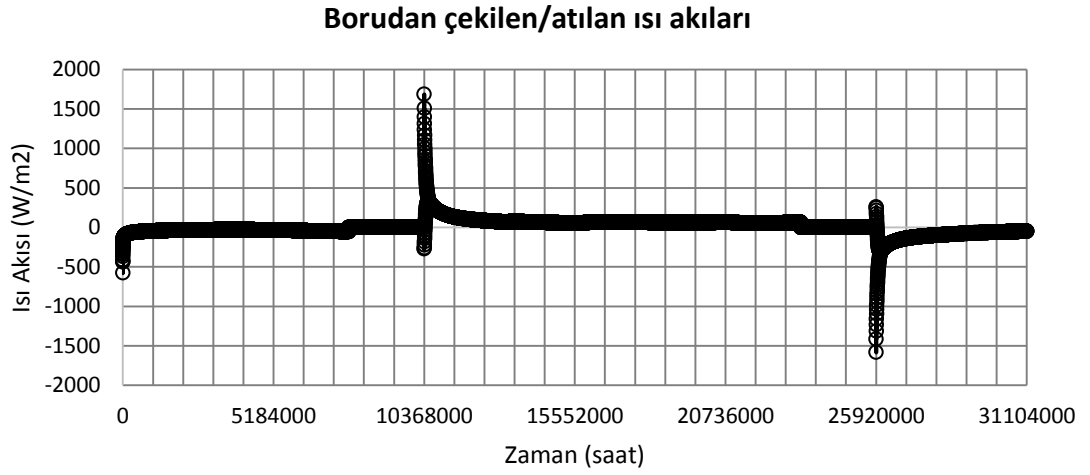
Çizelge 4.4 İstanbul için toprak yüzeyine gelen en yüksek ve en düşük ısı akıları

Ay	Maks (W/m2)	Min(W/m2)
Ocak	672,5446	-169,301
Şubat	83,49097	-74,5047

Çizelge 4.5 İstanbul için toprak yüzeyine gelen en yüksek ve en düşük ısı akıları
(devamı)

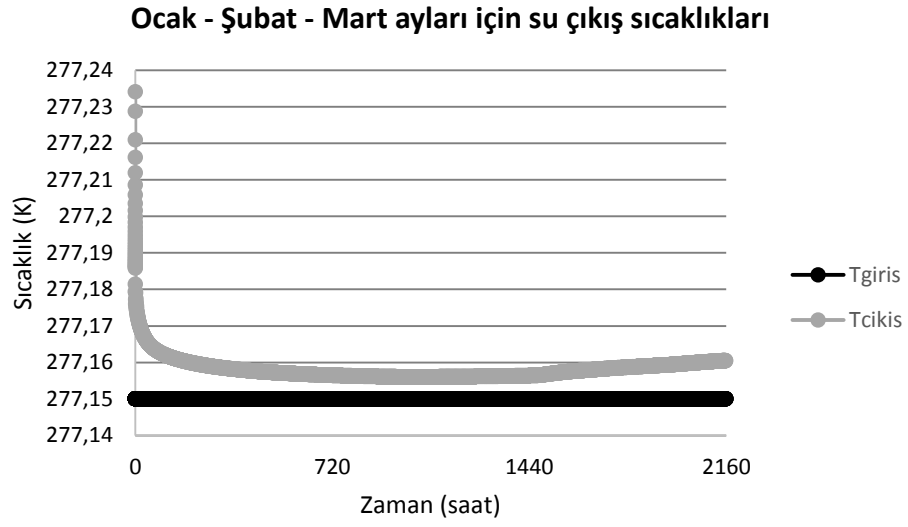
Mart	137,6989	-117,846
Nisan	172,2532	-146,045
Mayıs	195,4029	-175,542
Haziran	182,4193	-207,582
Temmuz	190,3172	-216,787
Ağustos	178,1388	-191,978
Eylül	150,2874	-149,24
Ekim	102,9407	-118,839
Kasım	76,43405	-76,2832
Aralık	53,34496	-54,1964

İstanbul şartlarında yıllık ısıtma ve soğutma sezonu düşünüldüğünde Nisan ve Ekim aylarında ayda ısıtma/soğutma ihtiyacı olmadığı kabulü yapılmıştır. Yazılan UDF’de bu aylarda borudan çekilen ve atılan ısılar “sıfır” dır. Analiz Ocak ayından başlatıldığında borudan çekilen/atılan ısılar Şekil 4.22’de verilmiştir.



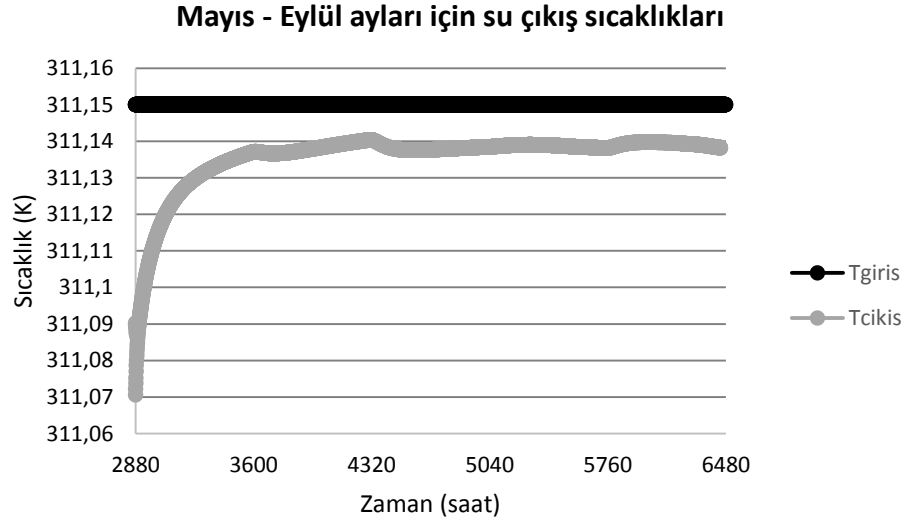
Şekil 4.27 Yıllık topraktan çekilen ve atılan ısı akıları

Ocak ve Mart ayları arasında su çıkış sıcaklıkları aşağıdaki gibidir;



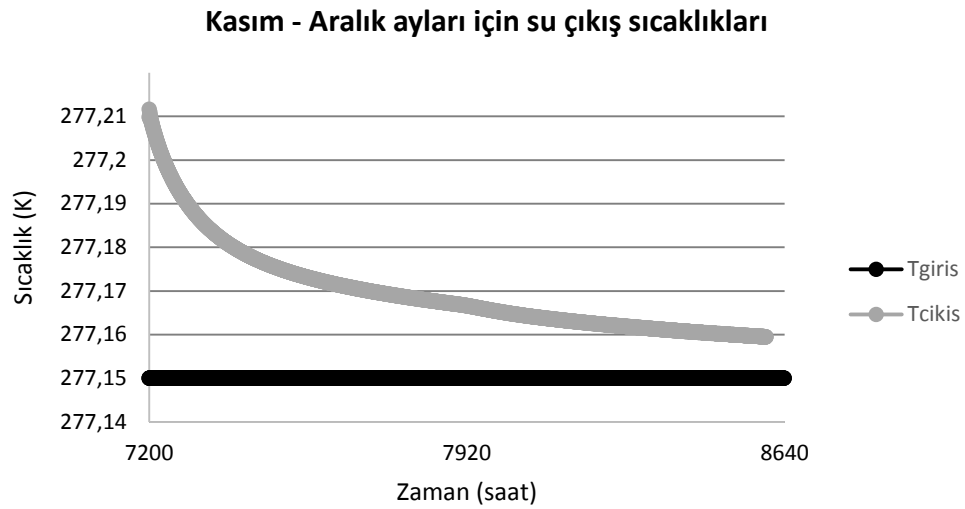
Şekil 4.28 Ocak-Mart ayları arasında su giriş ve çıkış sıcaklıkları

Mayıs ve Eylül ayları arasında su çıkış sıcaklıkları ise;



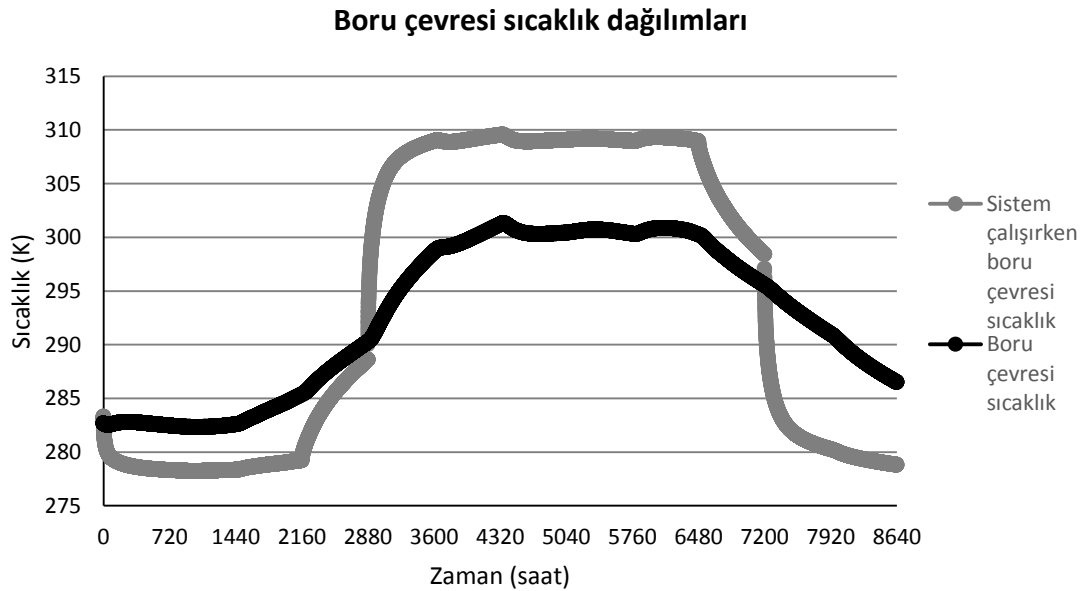
Şekil 4.29 Mayıs-Eylül ayları arasında su giriş ve çıkış sıcaklıkları

Kasım ve Aralık ayları için su çıkış sıcaklığı değişimi aşağıdaki gibidir;



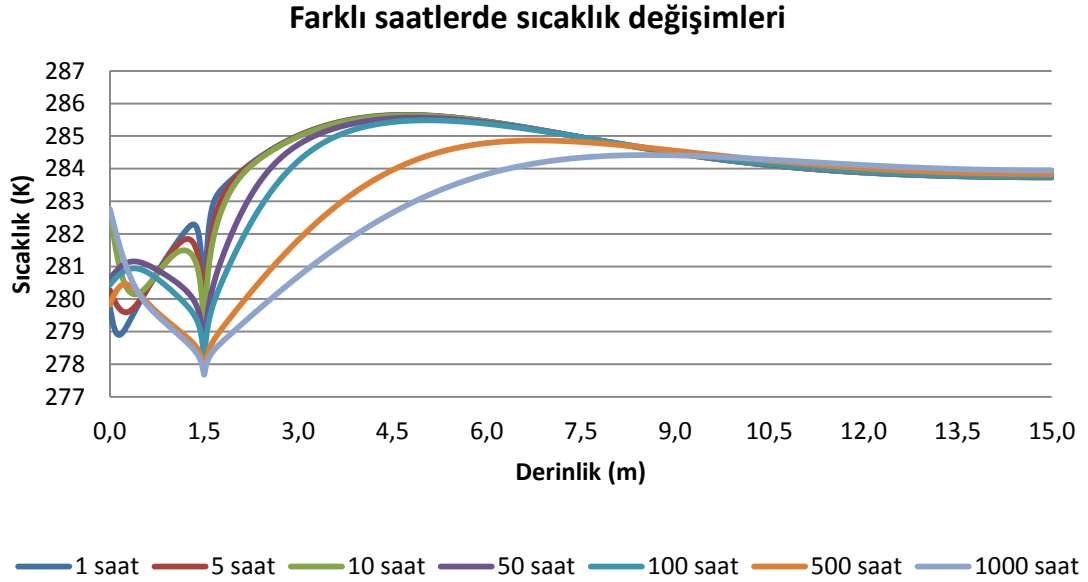
Şekil 4.30 Kasım – Aralık aylarında su giriş ve çıkış sıcaklıkları

Isıtma ve soğutma sezonları için belirlenen giriş sıcaklıkları ile 1 yıllık analiz yapıldığında, 1.5m de alınan çizgi boyunca ortalama sıcaklıklar aşağıdaki gibi olmaktadır;



Şekil 4.31 Borulu ve borusuz modelde 1.5m derinlikteki sıcaklık değerleri

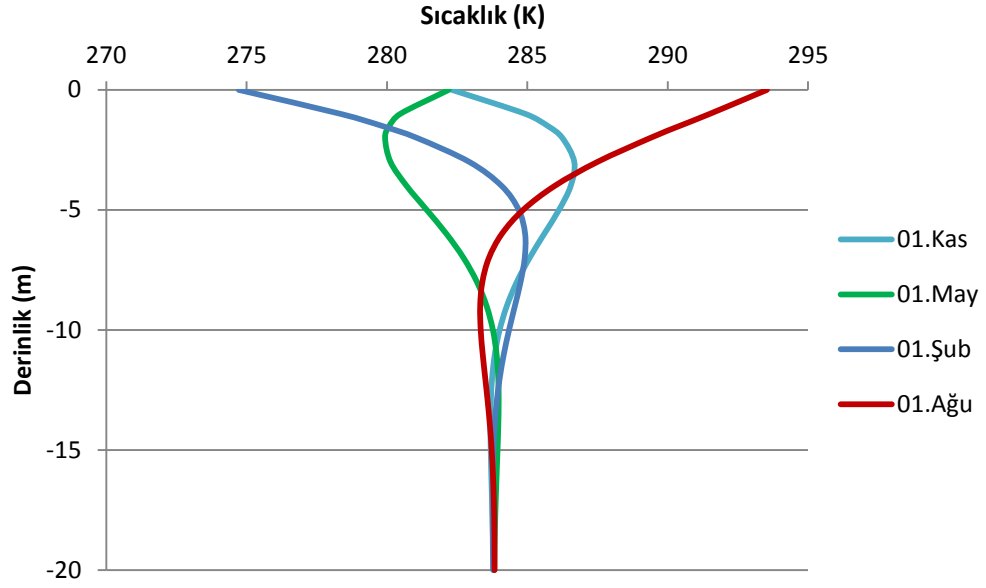
Gömme derinliği 1.5m, boru aralığı 500mm olan model için, analiz başlangıcından 1000 saate kadar olan boru ekseninden itibaren toprak sıcaklığının yataydaki değişimi aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.32 Analiz başladıktan sonra farklı saatlerde toprak sıcaklık değişimleri

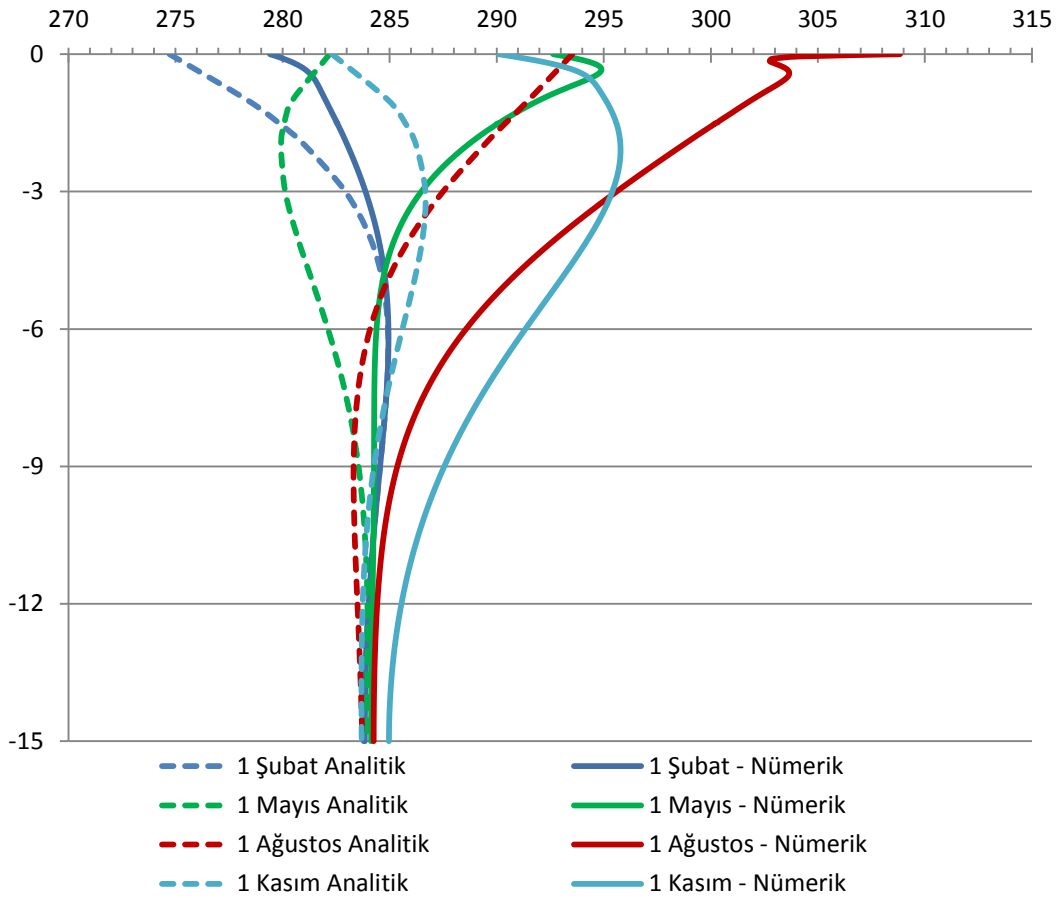
1 Şubat, 1 Mayıs, 1 Ağustos ve 1 Kasım tarihlerinde toprak sıcaklık değerlerinin derinliğe bağlı değişimi borusuz ve borulu model için aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Sonuçlar saat 04:00 için alınmıştır;

TUMAS verileri kullanılarak analitik denklem ile elde edilen grafik aşağıdaki gibidir;



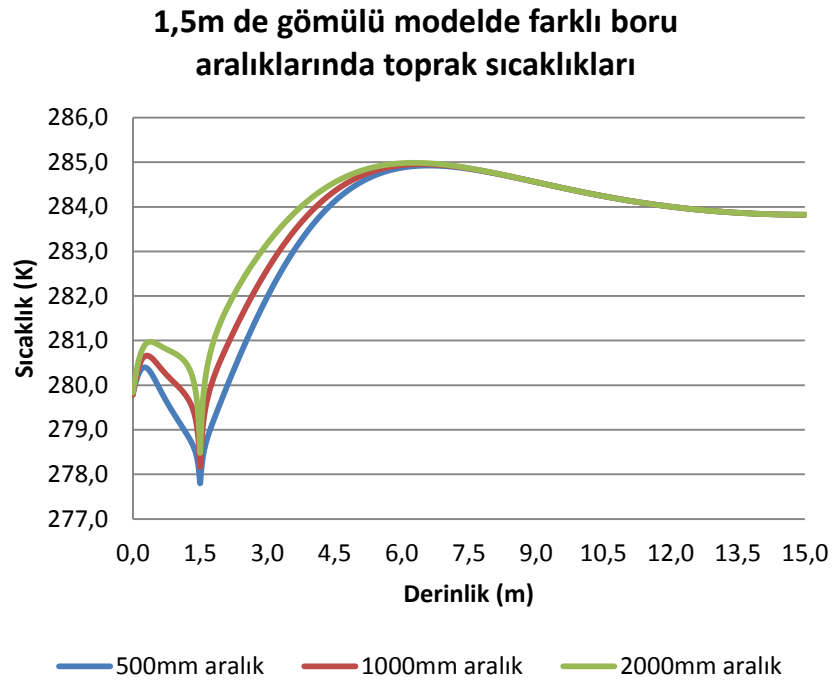
Şekil 4.33 TUMAS verilerine göre belirli aylarda derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri

Borusuz model ile yapılan analiz sonuçları aşağıdaki grafiğe eklenmiştir;

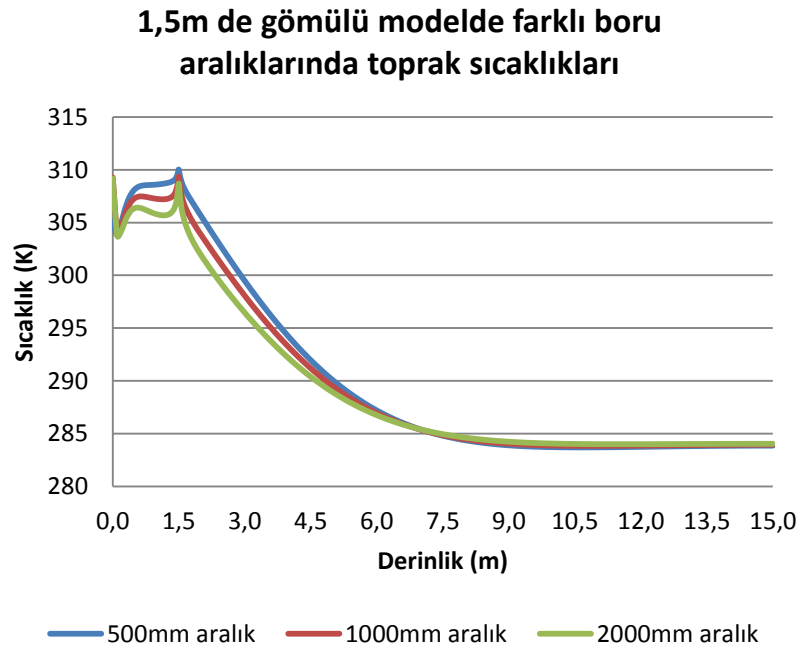


Şekil 4.34 TUMAS verileri ve Analitik sonuçlar ile bulunan belirli aylarda derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri

Farklı boru aralıklarında toprak sıcaklık değişimleri, 40. Gün saat 04:00 için aşağıda verilmiştir;

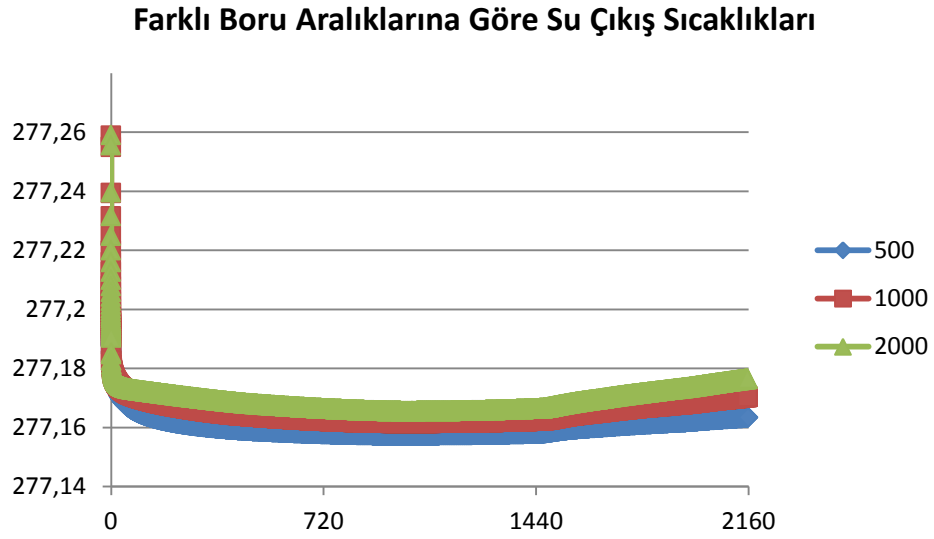


(a)



(b)

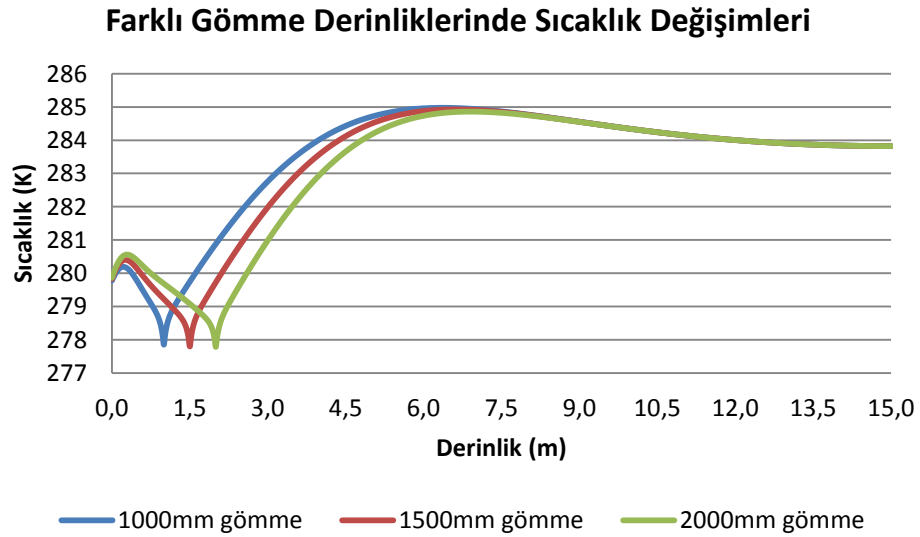
Şekil 4.35 1.5m de gömülü modelde farklı boru aralıklarında (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıkları



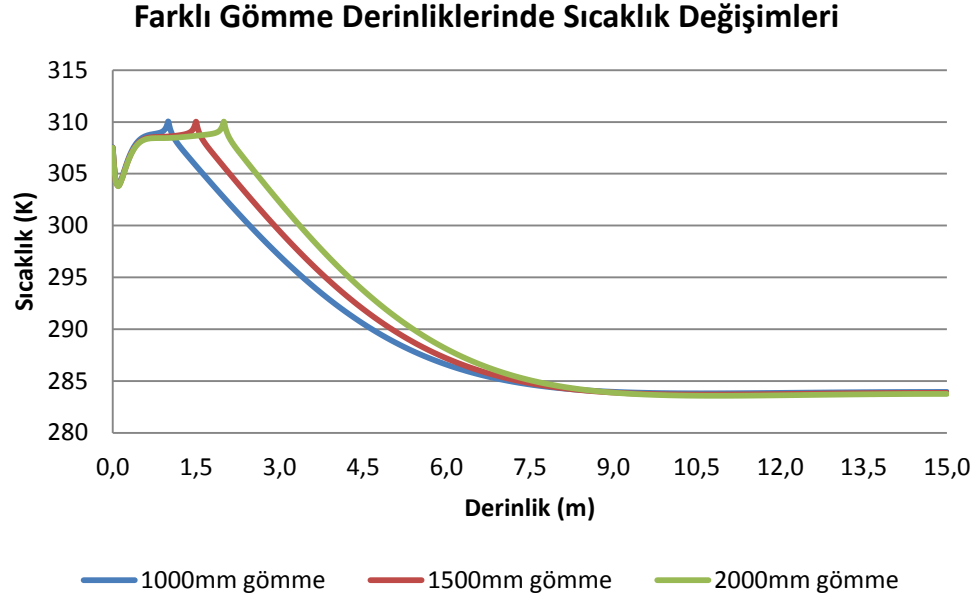
Şekil 4.36 1.5m de gömülü modelde farklı boru aralıklarında su çıkış sıcaklıklarının analiz başladıktan sonra ilk 3 ay için değişimi

Isıtma sezonunda, boru aralığı 500 mm olan model de sıcaklıklar daha düşük olduğu için çıkış sıcaklıkları daha düşüktür.

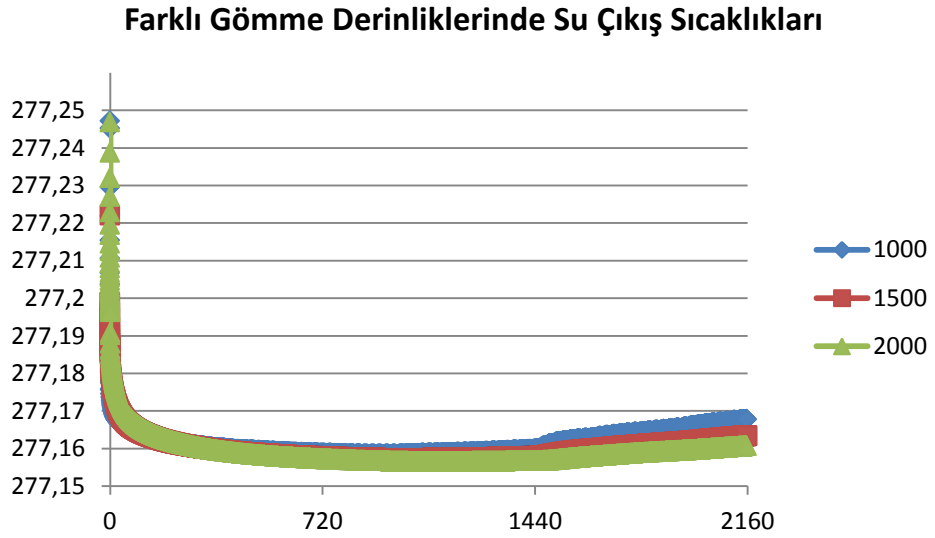
Boru aralığı 500mm olduğunda farklı gömme derinliklerinde 40. Gün saat 04:00 için toprak sıcaklık değerleri;



(a)



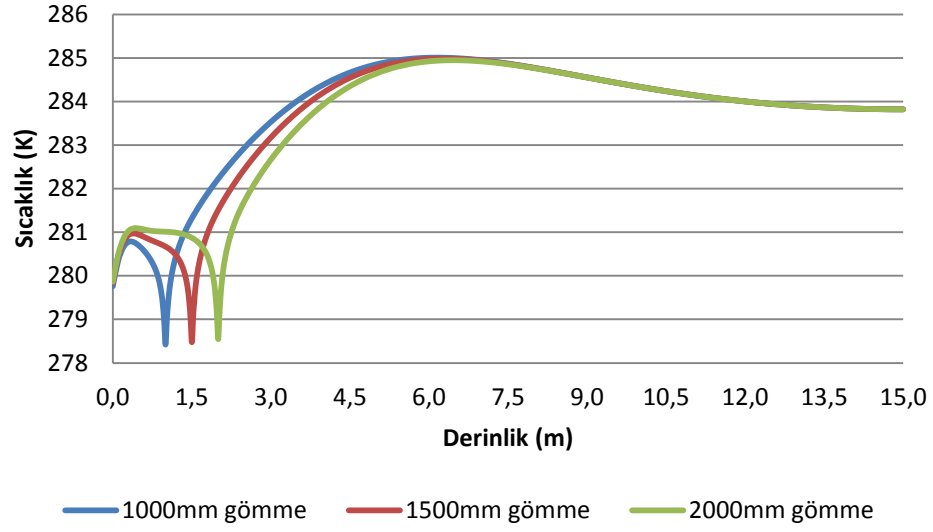
Şekil 4.37 500mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi



Şekil 4.38 150mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde su çıkış sıcaklıklarının analiz başladıktan sonra ilk 3 ay için değişimi

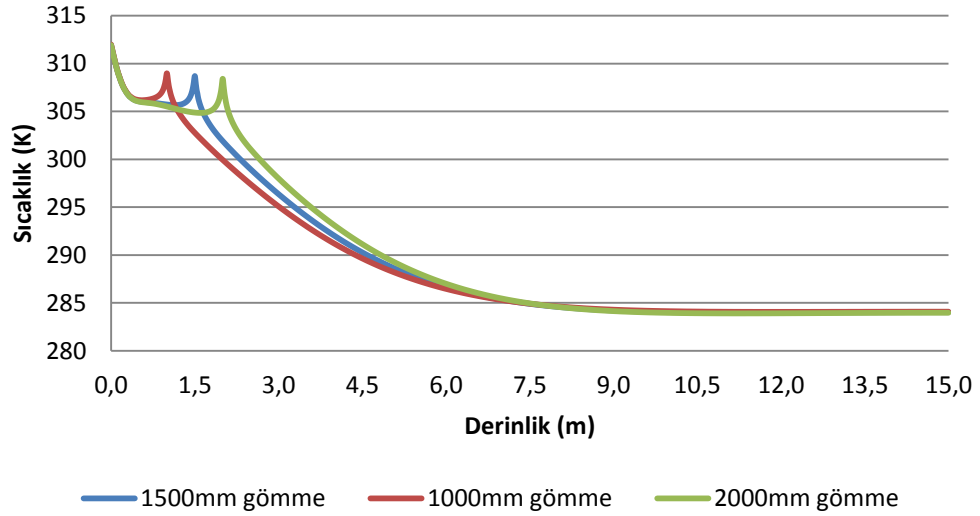
Boru aralığı 2000mm olduğunda 40. Gün saat 04:00 için toprak sıcaklık değerleri;

2000mm boru aralığında farklı gömme derinliklerinde sıcaklık dağılımları



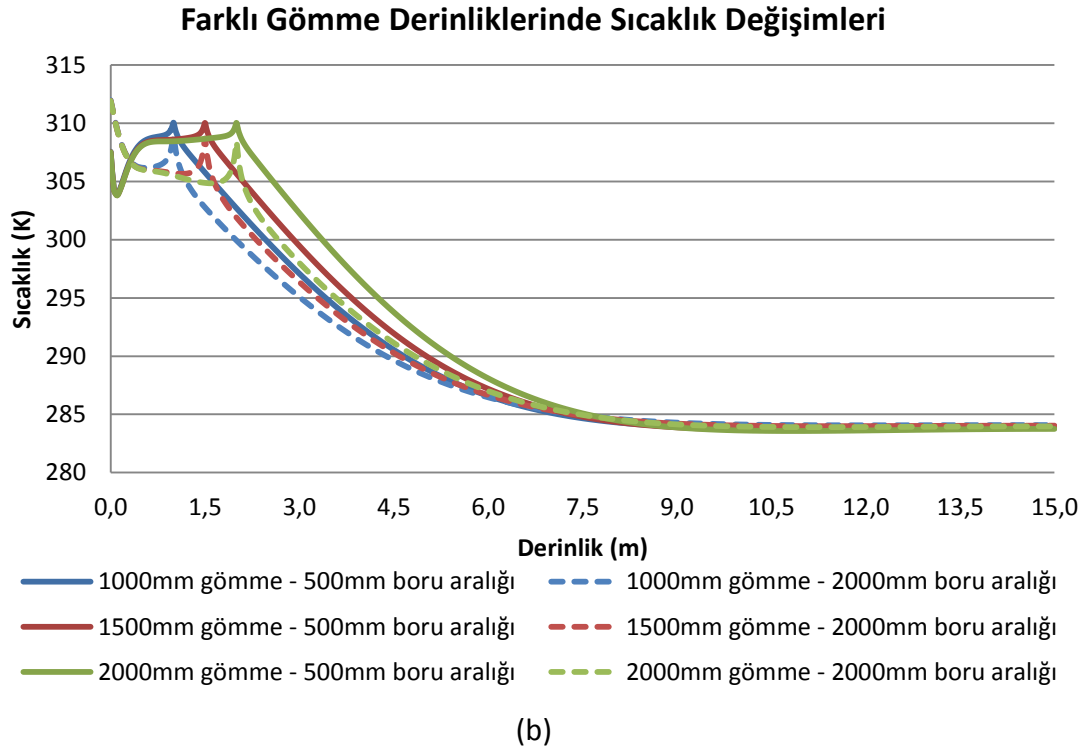
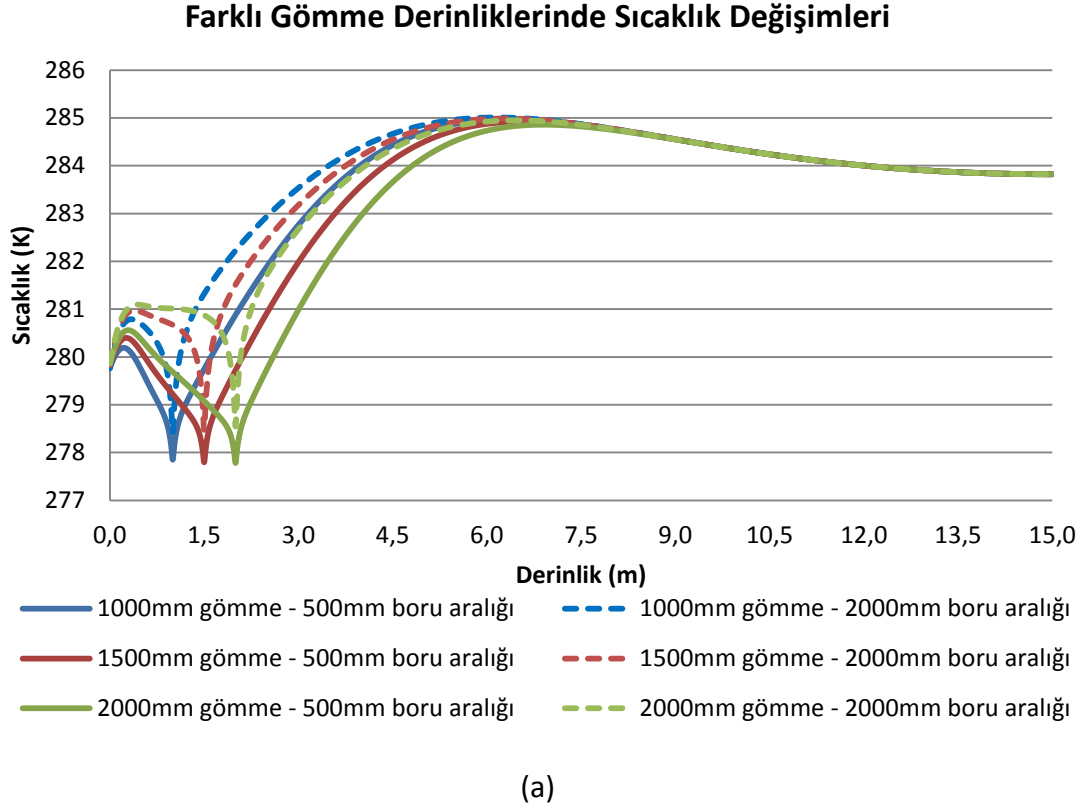
(a)

2000mm boru aralığında farklı gömme derinlikleri için sıcaklık değişimleri



(b)

Şekil 4.39 2000mm boru aralıklı modelde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi

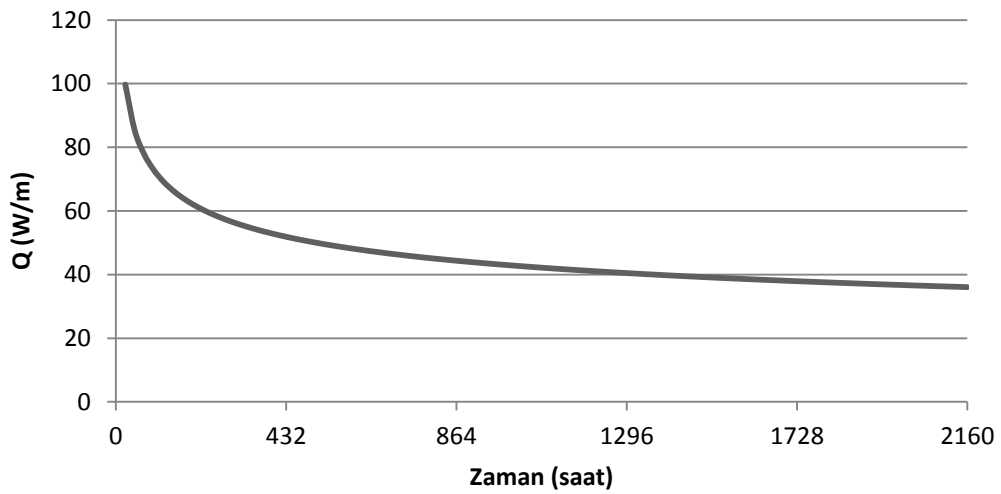


Şekil 4.40 500mm ve 2000mm boru aralıklı modellerde farklı gömme derinliklerinde (a) kış (b) yaz için toprak sıcaklıklarının değişimi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Topraktaki sıcaklık dağılımını iki boyutlu ve zamana bağlı olarak hesaplamak üzere farklı sınır koşullarını içeren C kodu ve sayısal bir model geliştirilmiştir.
- Taşınım, ısıtım ve buharlaşma etkisi modelde uygulanmış olup hesaplara dahil edilmiştir.
- Çizgisel kaynak yöntemi topraktaki sıcaklık dağılımını çok kısa süreler için yeterli hassasiyette hesaplayamaz. Şekil 5.1'den elde edilen sonuca göre, zamanla birim yüzeyden transfer olan ısı miktarının azalmasıdır. İlk gün sonunda transfer olan ısı miktarı, ikinci gün sonunda transfer olan ısı miktarından farklıdır. Toprak direncinin zamanla artması sebebi ile toprak ve su arasında ısı transferi başladığı andan itibaren transfer olan ısı miktarları birbirinden farklı değerler alacaktır.



Şekil 5.1 Çizgisel kaynak teorisine göre ısı akısının zamana göre değişimi

Çizgisel kaynak teorisine göre tasarlanacak olan sistemlerde bu durumun göz önüne alınması gerekmektedir.

- Su giriş sıcaklıkları borusuz yapılan analiz sonuçlarına göre ısıtma sezonunda 277.15 K, soğutma sezonunda 311.15 K alınmıştır.
- Toprak üst yüzeyine gelen net güneş ışıınımı, taşınım, buharlaşma ve uzun dalga ışıınımı toplamı yine toprağın üst kısmına sınır koşulu olarak verilmiştir. Yazılan C kodunda her gün için güneşin doğması ve batması tanımlanmıştır. Bu çalışmada saat 08:00'de güneş doğarken 18:00'de batmaktadır. Tüm yıl için gün uzunluğu aynı kabul edilmiştir. Analize başlamadan önce "Initial Condition" olarak analitik denklem modele verilmiştir. Analiz başladıktan sonra güneşin doğuşu ile birlikte yüzey sıcaklığında artış olmakta ve güneşin batışı ile birlikte yüzey sıcaklığında düşüş olmaktadır.
- İstanbul için nümerik bulunan aylık toprak sıcaklık değerleri Şekil 4.25'de verilmiştir. TUMAS'dan alınan veriler ile bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Nümerik çalışma sonucu bulunan sonuçlar TUMAS verilerine göre daha yüksektir. Bunun nedeni ise analiz sonucunda elde edilen verilerin güneş radyasyonlu veriler olup, TUMAS verilerine göre yüksek olmasıdır. Nümerik çalışma sonuçlarında Mayıs ayında toprak sıcaklığının en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bunun sebebi ise kullanılan değerlerdeki hatalardan olabileceği düşünülmüştür.
- Şekil 4.26'de toprak yüzeyine gelen ısı akısı verilmiştir. Gündüz saatlerinde yüzeye gelen toplam ısı akısı pozitif iken, gece negatif olmaktadır.
- Isıtma ve soğutma sezonları için analiz yapıldığında, ısıtma ya da soğutmanın başladığı zamanlarda çekilen/atılan ısı akısının yüksek olduğu daha sonra bu değerin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Analiz Ocak ayından başlatılmıştır ve ısıtma ve soğutma sezonlarında su çıkış sıcaklıkları zamana bağlı incelenmiştir. Su çıkış sıcaklığı analiz başlatıldığında, toprak-su sıcaklık farkı fazla olduğu için fazladır. Toprak sıcaklığı zamanla azaldığı için su çıkış sıcaklıkları da zamanla azalmaktadır.

- Borusuz ve borulu model de 1.5m deki sıcaklıkların kaydedilmesi ile oluşturulan grafiğe göre borulu modelde, ısıtma sezonunda toprak sıcaklıkları düşmekteyken, soğutma sezonunda ise boru çevresinde sıcaklıklar yükseldiği görülmektedir.
- 1.5m de gömülü, 500mm aralıklı modelde analiz başlangıcından itibaren belirli zamanlarda derinliğe bağlı sıcaklık değişimleri verilmiştir. Buna göre topraktaki ilk 0.8m lik kısımda, toprak sıcaklığının gece-gündüz sıcaklık farkından hızlı etkilendiği görülmektedir. Bu derinlikten sonra etkilenmemiş toprak sıcaklığına ulaşılmaktadır. Genel olarak 10 m ve daha derinde toprak sıcaklığının yıl boyunca değişmediği söylenebilir. Bu derinlikte toprak sıcaklığındaki değişim sıfır alınabilir. Toprak sıcaklığının derinliğe bağlı değişimi zamanla azalmaktadır.
- 1 Şubat, 1 Mayıs, 1 Ağustos ve 1 Kasım için sıcaklık değişimleri Şekil 4.33 ve 4.34’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Analitik veriler ile nümerik veriler arasında karşılaştırıldığında nümerik verilerin ortalama 7-8 °C fazla olduğu görülmüştür. Bu da analizden elde edilen verilerin daha önce belirtildiği gibi radyasyonlu olması ile ilgilidir. Mayıs ayında toprak sıcaklıklarının fazla olması, nümerik ve analitik veriler arasında yüksek sıcaklık farkı oluşturmuştur.
- 1.5m de gömülü modelde farklı boru aralıkları için yapılan analizde, aynı derinlikte gömülü olan modellerde, boru aralığı en az olan modelin ısıtma sezonunda sıcaklığının daha düşük, soğutma sezonunda ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, boru aralığı kıaldıkça boruların birbirlerinden etkilendiği ve sıcaklıkların bu oranda değiştiği görülmektedir.
- 500mm boru aralıklı olan modelde, gömme derinliği azaldıkça toprak sıcaklığının ısıtma sezonunda düştüğü, soğutma sezonunda arttığı gözlemlenmiştir.
- 500mm ve 2000mm boru aralıklı modellerde farklı gömme derinlikleri için toprak sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, 2000mm boru aralıklı modelin daha yüksek sıcaklıkta olduğu görülmüştür. Bu da toprakta depolanan enerji ile ilgilidir.

- Andırım sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak paralel borulardan oluşan yatay toprak ısı değıştircisi için ideal gömme derinliğinin 1.5 m ve uzun süre topraktan ısı çekilmesi durumunda boruların biri birlerini etkilememeleri için aradaki mesafenin 1.5 m olması gerektiğı görölmüşür. Bu şekilde dizayn edilen ısı değıştircisinden optimum fayda sağlamak mümkün olmaktadır. Ayrıca burada ısı pompasının günlük ve yıl boyu çalışma bilgileri kullanılarak optimizasyon yapılması daha uygun olacaktır. Çünkü verilen değerler uzun süreli ve aralıksız ısı pompası çalışma şartına göredir. Aralıklı çalışan bir ısı pompası için borular arası mesafe elverdiği oranda daha da düşük alınabilir. Bu sayede gerekli toprak yüzey alanı azaltılabilir.
- Yapılan çalışmalar sonucu, boru çapı/boru aralığı düşünöldüğünde, 1000mm boru aralığı için bulunan 0,0248 değerinin optimum değer olduğı, boru çapı/boru derinliği düşünöldüğünde ise 1500mm deki gömme derinliği için bulunan 0,0165 değerinin optimum değer olduğı bulunmuştur.
- Yine yapılan çalışmalar sonucu, geliştirilen modelin yatay borulu toprak ısı değıştircilerinin boyutlandırılmasında ve topraktaki sıcaklık dağılımının bulunmasında güvenilir bir şekilde kullanılabileceğı görölmüşür.
- Ansys-Fluent ticari bir yazılım olup, son dönemlerde sayısal çalışmalar için yaygın kullanılan program olduğı için tercih edilmiştir. Problemin çözümü yazılan kodda farklı hesaplamalar yaparak modele işlemleri ve uzun süre analiz edilmesine rağmen oldukça hızlıdır.

Bu tez çalışması neticesindeki öneriler aşğıdaki gibidir:

- Daha sonraki çalışmalarda, toprağın üst yüzeyi için rüzgar, kar gibi meteorolojik verilerin eklenmesi ile daha doğru sonuçların elde edilebileceğı öngörölmüşür.
- Toprağın ısı iletkenliği, toprağın içerdığı nem miktarı ve toprak sıcaklığıyla değışmektedir. Bu sebeple yaz ve kış aylarında toprak ısı iletkenliği değışmektedir. Bunun en büyük sebebi kışın yağış nedeniyle toprağın nem içeriğinin artmasıdır. Ayrıca sistem yazın soğutma amaçlı çalıştığında boru içinde dolaşan akışkan sıcaklığı toprak sıcaklığından yüksektir. Bunun sonucunda boru ve yakın çevresinden daha uzak bölgelere aynı zamanda kütle geçişi de olmakta ve bu bölgedeki nem içeriğı azalmaktadır. Hesaplamalarda bu

değişimin göz önünde bulundurulması ve yaz ve kış şartları için farklı ısı iletkenlik değerinin kullanılması gerekir. Daha doğru bir yaklaşım yapılabilmesi için toprak ısı iletkenliğinin zamana bağlı değişiminin incelenmesi ve hesaplamalara bu değişimin dâhil edilmesi gerekir.

- Isı değiştiricilerinde aktarılan ısı miktarını artırmanın bir diğer yolu yüzey alanı/hacim oranını artırmaktır. Kanatlı veya yüzey alanı/hacim oranı daha büyük kare vb. kesitli borularla ısı geçişi iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ingersoll, LR., (1954). Theory of earth heat exchangers for the heat pump, University of Wisconsin Press, 240-271.
- [2] Carslaw, HS. ve Jaeger JC., (1959). Conduction of heat in solids, Second Edition, Oxford University Press, Madison.
- [3] Rottmayer, SP. ve Beckman, WA., (1997). "Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium", ASHRAE Transactions, 103:651-658.
- [4] Yavuzturk, C., Spitler, JD. ve Rees, SJ., (1999). "A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers", 105:465-467.
- [5] Piechowski, M., (1999). "Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: theoretical development", International Journal of Energy Research, 23:571-588.
- [6] Salah El-Din, MM., (1999). "On the heat flow into the ground", Renewable Energy, 18:473-490.
- [7] Tarnawski, VR., Gori, F., Wagner, B. ve Buchan, GD., (2000). "Modelling approaches to predicting thermal conductivity of grounds at high temperatures", International Journal of Energy Research, 24:403-423.
- [8] Popiel, CO., Wojtkowiak, J. ve Biernacka, B., (2001). "Measurements of temperature distribution in ground", Experimental Thermal and Fluid Science, 25:301-309.
- [9] Mihalakakou, G., (2002). "On estimating ground surface temperature profiles", Energy and Buildings, 34:251-259.
- [10] Svec, OJ., Goodrich, LE. ve Palmer, JHL., (1983). "Heat transfer characteristics of in-ground heat exchangers", Energy, 7:265-278.
- [11] Mei, VC., (1986). "Horizontal ground coil heat exchanger: Theoretical and experimental analysis", Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- [12] Tarnawski, V.R. ve Leong, W.H., (1993). "Computer analysis, design and simulation of horizontal ground heat exchangers", Int. J. Energy Res, 467-477.

- [13] Mihalakakou, G., Santamouris, M. ve Asimakopoulos, D.N., (1994). "Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers", *Solar Energy*, 53:301-305.
- [14] Piechowsky, M., (1996). A ground coupled heat pump system with energy storage, Doktora Tezi, The University of Melbourne.
- [15] Lacroix, M., Gauthier, C. ve Bernier, H., (1997). "Numerical simulation of soil heat exchanger storage systems for greenhouses", *Solar Energy*, 60:333-346.
- [16] Gauthier, C., Lacroix, M. ve Bernier, H., (1997). "Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses", *Solar Energy*, 333-346.
- [17] Krarti, M., Lopez, AC., Claridge, DE. ve Kreider, J., (1995). "Analytical model to predict annual soil surface temperature variation", *Solar Energy Eng*, 117:91-99.
- [18] Puri, VM., (1987). "Heat and mass transfer analysis and modeling in unsaturated ground soils for buried tube systems", *Energy Agriculture*, 6:179-193.
- [19] Kumar, R., Ramesh, S. ve Kaushik, SC., (2003). "Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-airconditioned building", *Build Environment*, 38:807-813.
- [20] Larsen, S.F., Filippín, C. ve Lesino, G., (2003). "Earth-to-air heat exchange through a buried pipe at a school in La Pampa, Argentina", *The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Santiago, Chile, 9-12.
- [21] Kumar, R., Ramesh, S. ve Kaushik, SC., (2003). "Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building", *Building Environment*, 38:807-813.
- [22] Kumar, R., Kaushik, SC. ve Garg, SN., (2006). "Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network", *Renewable Energy*, 31:1139-1155.
- [23] Esen, H., İnalli, M. ve Esen, M., (2007). "Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system", *Building and Environment*, 1126-1134.
- [24] Esen, H., İnalli, M., Esen, M. ve Pihtili, K., (2007). "Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers", *Building and Environment*, 3606-3615.
- [25] Esen, H., İnalli, M. ve Esen, M., (2007). "A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling", *Building and Environment*, 1955-1965.
- [26] Florides, G. ve Kalogirou, S., (2007). "Ground heat exchangers: a review of systems, models and applications", *Renewable Energy*, 2461-2478.
- [27] Leek, Ho. ve Strand, RK., (2008). "The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings", *Energy and Buildings*, 486-494.

- [28] Demir, H. ve Koyun, A., Temir, G., (2009). "Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification", *Applied Thermal Engineering*, 29:224-233.
- [29] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G.D. ve Mathur, J., (2009). "Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating", *Energy and Buildings*, 1151-1154.
- [30] Eicker, U. ve Vorschulze, C., (2009). "Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation", *Renewable Energy*, 34:1126-1133.
- [31] Li, S., Yang, W. ve Zhang, X., (2009). "Soil temperature distribution around a U tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system", *Applied Thermal Engineering*, 29:3679-3686.
- [32] Tittlein, P., Achard, G. ve Wurtz, E., (2009). "Modelling earth-to-air heat exchanger behaviour with the convolutive response factors method", *Applied Energy*, 86:1683-1691.
- [33] Zhang, J. ve Haghighat, F., (2010). "Development of artificial neural network based heat convection algorithm for thermal simulation of large rectangular cross- sectional area earth-to-air heat exchangers", *Energy and Buildings*, 42:435-440.
- [34] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, GD. ve Mathur, J., (2010). "Performance analysis of earth-pipe- air heat exchanger for summer cooling", *Energy and Buildings*, 42:645-648.
- [35] Vaz, J., Sattler, MA., Santos, ED. ve Isoldi, LA., (2011). "Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger", *Energy and Buildings*, 43:2476-2482.
- [36] Benazza, A., Blanco, E., Aichouba, M., Rio, J. L. ve Laouedj, S., (2011). "Numerical Investigation of Horizontal Ground Coupled Heat Exchanger", *Energy Procedia*, 6:29-35.
- [37] Gonzalez, R.G., Verhoef, A., Vidale, P.L., Main, B., Gan, G. ve Wu, Y., (2012). "Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK", *Renewable Energy*, 44:141-153.
- [38] Colangelo, G., Congedob, P.M. ve Starace, G., (2012). "CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations", *Applied Thermal Engineering*, 24-32.
- [39] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G., Mathur, J. ve Aseri, T., (2013). "CFD analysis based parametric study of derating factor earth air tunnel heat exchanger", *Applied Energy*, 103:266-277.
- [40] Florides, G., Theofanous, E., Iosif-Stylianou, I., Tassou, S., Christodoulides, P., Zomeni, Z., Tsilakis, E., Kalogirou, S., Messaritis, V., Pouloupatis, P. Ve Panayiotou, G., (2013). "Modeling and assesment of the efficiency of horizontal and vertical ground heat exchangers", *Energy*, 58:655-663.

- [41] Li, X., Wu, W., Wang, B., You, T. ve Shi, W., (2013). "A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump", *Renewable Energy*, 59:39-48.
- [42] Nam, Y. ve Chae, H., (2014). "Numerical simulation for the optimum design of ground source heat pump system using building foundation as horizontal heat exchanger", *Energy*, 73:933-942.
- [43] Simms, R. B., Haslam, S. R. ve Craig, J. R., (2014). "Impact of soil heterogeneity on the functioning of horizontal ground heat exchangers", *Geothermics*, 50:35-43.
- [44] Capozza, A., Zarrella, A. ve Carli, M., (2015). "Long term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters", *Energy and Buildings*, 93:50-64.
- [45] Metz, P.D., (1983). Ground Coupled Heat Pump System Experimental Results, Brookhaven National Laboratory, Upton, Report No. BNL-33540
- [46] Doherty, P.S., Al-Huthaili, S., Riffat S.B. ve Abodahab, N., (2004). "Ground source heat pump e description and preliminary results of the Eco House system", *Applied Thermal Engineering*, 24:2627-2641.
- [47] Coskun, S., Pulat, E., ve Ünlü, K., Yamankaradeniz, R., (2008). "Experimental performance investigation of a horizontal ground source compression refrigeration machine", *International Journal of Energy Research*, 32:44-56.
- [48] Rawlings, R., Ground source heat pump: a technology review, www.bsria.co.uk, 10 Mart 2015
- [49] Singh, H., Muetzeb, A. ve Eames P.C., (2010). "Factors influencing the uptake of heat pump technology by the UK domestic sector", *Renewable Energy*, 35:873-878.
- [50] Energy Saving Trust, Heat Pumps in the UK e A Monitoring Report (2000) GIR72, London, <http://www.energysavingtrust.org.uk/business/Global-Data/Publications/Heat-Pumps-in-the-UK-a-monitoringreport- GIR72>, 10 Mart 2015
- [51] Energy Saving Trust, Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and Installation of Closed-loop Systems (2007 Edition) (2007) CE82/GPG339, www.est.org.uk/housingbuildings, 10 Mart 2015
- [52] Akademi Makina, Isı Pompası, http://www.akademimakina.com/makale_isi_%20pomposi.pdf , 11 Mart 2015
- [53] Karabacak, R., Acar, Ş.G. ve Atalay, Ö., (2008). Toprak Kaynaklı Isı Pompası ile Güneş Enerjisi Destekli Bir Pilot Tesiste Kurutma ve İklimlendirme Uygulamaları, MMO Yayınları.
- [54] Chiasson, A. D., (1999). Advances In Modeling Of Ground Source Heat Pump Systems, Yüksek Lisans Tezi, Oklahoma State University.
- [55] Doğan, V., (2003). Su-Toprak Kaynaklı Isı Pompaları, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi

- [56] Karabacak, R., Acar, Ş.G. ve Atalay, Ö., (2008). Toprak Kaynaklı Isı Pompası ile Güneş Enerjisi Destekli Bir Pilot Tesiste Kurutma ve İklimlendirme Uygulamaları, MMO Yayınları.
- [57] Ünlü, K., (2005). Hava Ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- [58] Akçasarı, E., (2004). Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Termo-Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [59] Selvi, U., (2002). Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Dizaynı Ve Lpg'li Isıtma Sistemleriyle Tekno-Ekonomik Karşılaştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği.
- [60] Lund, J. W. ve Boyd T. L., (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwid Review, Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne Australia.
- [61] Seyrek, A., (2010). Mahal Isıtmasında Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Kullanımı, Dumlupınar Üniversitesi.
- [62] Ünlü, K., (2005). Hava Ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- [63] Form Grup, Açık Çevrimli Toprak Kaynaklı Isı Değiştiricisi Örneği, <http://www.formgroup.com/UserFiles/image/climatemaster/ornek4.png>, 11 Mart 2015
- [64] Seyrek, A., (2010). Mahal Isıtmasında Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi
- [65] Özsolak, O., (2011). Güneş ve Toprak Enerjisi Kaynaklı Isı Pompasının Elazığ Şartlarında Konut Isıtması İçin Kullanımının Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [66] National Rural Electric Cooperative Association, (1988). Closed-loop / ground-source heat pump systems: Installation guide, NRECA Research Project 86-1, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma
- [67] Arslan, A. E., (2014). Toprak Kaynaklı Isı Pompası İle Doğalgazlı Kombi Birleşik Sisteminin Enerji Verimliliği Yönünden Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi.
- [68] Rehau, Toprak kaynaklı ısı değiştiricisinin yüzeyden ısıtma sistemi ile birlike kullanım örneği, <http://www.rehau.com/us-en/mechanical-and-plumbing/impr-costs-and-engy/871390>, 12 Mart 2015
- [69] Midori, Toprak kaynaklı ısı değiştiricisinin fan coil ile kullanımı, http://midori.com.tr/isi_pompasi_kullanım_yerleri.html, 12 Mart 2015
- [70] Siegenthaler, J., Corbett, H., Fantauzzi, J. ve Drake, L., (2002). Radiant Basics: A Basic Course For Radiant Panel Heating Systems, Radiant Panel Association.

- [71] Midori, Toprak kaynaklı ısı değiştıcısının radyatörlü sistem ile kullanımı, http://midori.com.tr/isi_pompasi_kullanım_yerleri.html, 12 Mart 2015
- [72] Toprak kaynaklı ısı değiştıcısının radyatörlü sistem ile kullanımı, <http://www.b-es.org/sustainability/sustainable-technology-briefing-sheets/air-source-heat-pump-guidance/>, 13 Mart 2015
- [73] Hepbaşlı, A. ve Ertöz, A.Ö., (1999). Geleceğin teknolojisi: Yer kaynaklı ısı pompaları, IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği kongresi ve sergisi, İzmir, 455-492.
- [74] Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, DE. ve Kreider, JF., (1995). "Analytical model to predict annual soil surface temperature variation", Journal of Solar Energy Engineering, 1995, 117/91.
- [75] Kusuda, T. ve Achenbach, PR., (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in United States, Ashrae Transactions, Vol. 71, Part 1.
- [76] Hollmuller, P. ve Lachal B., (2014). "Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance", Applied Energy, 119:476-487.
- [77] Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani M. ve Guerin, F., (2015). "Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities", Computers and Geotechnics, 63:99-111.
- [78] Yang, W., Kong, L. ve Chen, Y., (2015). "Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers", Applied Thermal Energy, 75:259-269.
- [79] Davila, L.R., Xaman, J., Arce J. ve Perez H., (2014). "Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates", Energy and Buildings, 76:238-248.
- [80] Misra R., Bansal V., Agrawal G., Mathur J. ve Aseri T., (2013). "Transient analysis based determination of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger in winter", Energy and Buildings, 58:76-85
- [81] Brum, R.S., Isoldi L.A., Santos, E.D., Vaz, J. ve Rocha L., (2013). "Two-dimensional computational modeling of the soil thermal behavior due to the incidence of solar radiation", Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 12, No. 2, 63-68.
- [82] Chisson, AD., (1999). Advances in modeling on ground source heat pump systems, Yüksek Lisans Tezi, Oklahoma State University.
- [83] Nevada, Toprak yüzeyindeki enerji dengesi örneği, <http://nevada.usgs.gov/water/et/measured.htm> , 16 Mart 2015

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Öykü GÜRES
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.06.1991 - AYDIN
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : oykugures@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makina Mühendisliği	Ege Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Söke Hilmi Fırat Anadolu Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014-halen	Mir Araştırma ve Geliştirme AŞ	Araştırma ve Geliştirme Mühendisi
2014-2014	Mir Araştırma ve Geliştirme AŞ	Asistan Araştırma ve Geliştirme Mühendisi
2012-2013	Pekcan Mühendislik AŞ	Part-time Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Duman, O., Koca, A., Acet R. C., Çetin M. G., Gemici, Z., (2015). (2015). “A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings based on degree day approach for three different demo sites in Europe”, International Conference Future Buildings&Districts Sustainability from nano to urban scale, 155-160.
- 2 Duman, O., Demir H., Koca A., (2015). “Numerical Analysis for Energy Performance of Ground Source Heat Exchanger Under Environmental Conditions of Istanbul”, The European Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2015, 137-144.

Proje

Araştırmacı olarak yer aldığım projeler aşağıdaki gibidir;

1. CityFied : RepliCable and InnovaTive Future Efficient Districts and cities: AB 7. Çerçeve Projesi – Proje No: 609129
2. R2CITIES : Renovation of Residential Urban Spaces: Towards nearly Zero Energy Cities: AB 7. Çerçeve Projesi – Proje No: 314473
3. Toprak ve Donatılı Bina Temeli Kaynaklı Isı Pompalarında Kaynak Isı Değiştiricisi Performansının İyileştirilmesi İçin Yeni Bir Uygulama Yönteminin Geliştirilmesi: SAN-TEZ Projesi – Proje No: 0472.STZ.2013-2