

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MINİMUM ENERJİLİ BİNA TASARIMI
(TOPRAK ENERJİSİYLE)

106282

Mak. Müh. Timur DİZ

106282

F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULTAYI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOYUN

Prof. Dr. Hasan Heperkan
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Koyun
Doç. Dr. Mesut ÖZGÜLER

İSTANBUL, 2001

SİMGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR	5
2.1 Carnot ve Ters Carnot Çevrimleri	5
2.2 İdeal Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevrimi	7
2.3 Gerçek Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevrimi	8
2.4 Soğutma Makineleri ve Isı Pompaları	10
2.5 Isı Kaynakları	13
2.5.1 Hava	13
2.5.2 Su	14
2.5.3 Toprak	15
2.5.4 Güneş	16
2.6 Isı Pompalarında Kullanılan Soğutucu Akışkanlar	18
2.6.1 Soğutucu akışkan özellikleri	19
2.6.2 Kullanılan soğutucu akışkanlar	20
2.6.3 Karışımlar	22
2.6.4 Doğal akışkanlar	23
3. YER KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR	25
3.1 Yer Kaynaklı Isı Pompasının Çalışma Şekli ve Elemanları	26
3.1.1 Yer ısı değiştiricisi	27
3.1.1.1 Seri veya paralel akış	28
3.1.1.2 Yer ısı değiştiricisi tipleri	29
3.1.1.2.1 Kapalı çevrimli sistemler	30
3.1.1.2.1.1 Yatay yer ısı değiştiricileri	31
3.1.1.2.1.2 Spiral yer ısı değiştiricileri	33
3.1.1.2.1.3 Düşey yer ısı değiştiricileri	34
3.1.1.2.1.4 Yer üstü suyuna daldırılmış yer ısı değiştiricileri	36
3.1.1.2.2 Açık çevrimli sistemler	37
3.1.1.2.3 Direkt genişlemeli sistemler	38
3.1.2 Yer kaynaklı ısı pompası	40
3.1.3 Dağıtım sistemi	42
3.2 Yer Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları	43

4.	YER ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDEKİ ISI TRANSFERİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR	47
4.1	Fourier İfadesi ve Kabuller	47
4.2	Üç Boyutlu Isı İletiminin Polar Koordinat Sisteminde En Genel İfadesi...	49
4.3	Başlangıç ve Sınır Şartları	52
4.3.1	Başlangıç şartı	52
4.3.2	Sınırdaki ısı akısının belirtilmesi	52
4.3.3	Sınırdaki taşınım ile ısı transferinin belirtilmesi	53
4.3.4	Zamana bağlı şart	53
4.5	Bir Boyutlu Periyodik Isı Transferi	53
5.	TOPRAK SICAKLIĞI SALINIMININ HESAPLANMASI	63
6.	TOPRAKTAKİ ISI TRANSFERİ İLE İLGİLİ TEMEL KABULLER	70
6.1	Sabit Isı Akısı Kabulü	70
6.2	Sabit Yüzey Sıcaklığı Kabulü	73
7.	TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASININ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU	85
7.1	Isı Dağıtım Sisteminin Belirlenmesi	85
7.2	Yer Isı Değiştiricisinde Dolaştırılan Akışkan Sıcaklıklarının Belirlenmesi.	86
7.3	Isı Pompasının Dizaynı	88
7.4	Yer Isı Değiştiricisi Dizaynı	89
8.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	126
	KAYNAKLAR	130
	EKLER	131
	Ek 1 İstanbul Göztepe İçin Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine Göre 1985 ve 1999 Yılı 5cm ve 1m Derinliklerde Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri	132
	Ek 2 İstanbul Göztepe İçin Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları	138
	Ek 3 İstanbul Göztepe İçin Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları.....	150
	Ek 4 Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri	162
	Ek 5 Boru Özellikleri ve Fiyatları	164
	ÖZGEÇMİŞ	165

SİMGE LİSTESİ

a_j	j maddesinin ısı yayılma katsayısı
A_j	j yüzeyinin alanı
b	İki boru arasında bırakılması gereken mesafe
B_a	Bakım masraflarının elektrik giderlerine oranı
C	Bugünkü değer katsayısı
C_{pj}	j maddesinin özgül ısınma ısısı
COP	Isı pompasının etkinlik (performans) katsayısı
COP_G	Sistemin genel performans katsayısı
d	Boru çapı
F_θ	Elektrik veya yakıt fiyatının artış oranı
f_a	Isı pompası aylık çalışma süresi
g	Yerçekimi ivmesi
G_v	Vinç kepçesinin ağız genişliği
h	Boiler tipi ısı eşanjörünün yüksekliği
h_j	j noktasının (halinin) özgül entalpisi
H_g	Geometrik basma yüksekliği
H_m	Manometrik basma yüksekliği
i	Faiz oranı
k_j	j maddesinin ısı iletim katsayısı
L	Uzunluk (Boru boyu)
m_j	j akışkanın kütleli debisi
n	Modül sayısı, proje ömrü
N_e	Efektif pompa gücü
N_m	Pompa gücü
P	Periyot
r	Yarıçap
Re	Reynolds sayısı
R_E	Etkilenme yarıçapı
s_j	j noktasının (halinin) özgül entropisi
t	Zaman
T_j	j maddesinin sıcaklığı
T_m	Ortalama toprak sıcaklığı
T_o	Toprak sıcaklığının değişim miktarı (genlik)
u	Akış hızı
$V_{hafr.}$	Hafriyat hacmi
z	İntegral sabiti
q	Birim yüzeyden transfer olan ısı miktarı
Q	Transfer olan toplam ısı miktarı
Q_z	Birim boru boyunda transfer olan ısı miktarı
x	Gömme derinliği
w	Birim yüzeyden transfer olan ısı miktarı
W	İş
α	Akışkanın taşınımıyla ısı transfer katsayısı
α_{emn}	Emniyet katsayısı
β	İntegral değişkeni
λ	Lineer yük kayıp katsayısı
ρ_j	j maddesinin yoğunluğu
μ	Dinamik viskozite
η_p	Pompa verimi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Carnot çevriminin $P-v$ ve $T-s$ diyagramı	5
Şekil 2.2	Ters Carnot çevriminin $P-v$ ve $T-s$ diyagramı	6
Şekil 2.3	İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin düzeni ve $T-s$ diyagramı	8
Şekil 2.4	Gerçek buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin düzeni ve $T-s$ diyagramı ...	9
Şekil 2.5	Soğutma çevrimi ve elemanları	10
Şekil 2.6	Isı pompası çevrimi ve elemanları	12
Şekil 3.1	Güneş enerjisinin jeokütle tarafından depolanması	25
Şekil 3.2	Bazı yer kaynaklı ısı pompası uygulamaları	26
Şekil 3.3	Kapalı ve açık çevrim	28
Şekil 3.4	Değişik tip yer ısı değiştiriciler	30
Şekil 3.5	Paralel ve seri akışlı yatay yer ısı değiştiriciler	32
Şekil 3.6	Seri ve paralel akışlı düşey yer ısı değiştiriciler	35
Şekil 3.7	Kesit geometrisine göre düşey yer ısı değiştiricileri	35
Şekil 3.8	Yatay ve düşey yer ısı değiştiricileri	36
Şekil 3.9	Paket tip yer kaynaklı ısı pompaları	40
Şekil 3.10	Soğutma kulesi ilave edilmiş sistem	40
Şekil 3.11	Güneş kollektörü destekli sistem	41
Şekil 3.12	Yer kaynaklı ısı pompasının işleyişi ve ısı dağıtım sistemi seçenekleri	42
Şekil 3.13	Çoklu ısı pompası sistemi ile ısı dağıtımı	43
Şekil 3.14	Değişik sistemlerin performanslarının mukayesesi	44
Şekil 3.15	Değişik hava şartlandırma ekipmanları için yıllık işletme giderleri	45
Şekil 4.1	Sabit sıcaklık ve ısı akıları eğrileri	48
Şekil 4.2	Silindirik koordinatlarda üç boyutlu ısı iletimi	49
Şekil 4.3	Matematiksel olarak öngörülen toprak sıcaklığı değişimi	54
Şekil 4.4	Toprak sıcaklığı değişiminin derinlikle ilişkisi	56
Şekil 4.5a	A.B.D için ortalama toprak sıcaklıkları	58
Şekil 4.5b	A.B.D için yüzeydeki sıcaklık değişimi miktarı	58
Şekil 4.6	Pratik toprak sıcaklıkları dağılımları	59
Şekil 4.7	Toprak cinsi ve derinliğe bağlı sıcaklık dağılımları	61
Şekil 5.1	Yılın günlerinin periyot içindeki konumları	65
Şekil 5.2	Deneyisel verilerle hesaplanan değerlerin mukayesesi	66
Şekil 5.3	Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişimi	69
Şekil 6.1	Hesaplanan zamana bağlı ısı akısı değerlerinin mukayesesi	78
Şekil 6.2	Hesaplanan zamana bağlı ısı akısı değerlerinin mukayesesi	79
Şekil 6.3	Boru boyunca meydana gelen ısı transferi	82
Şekil 6.4	Boru boyunca sıcaklık değişimi	84
Şekil 7.1	Sistemin prensip şeması ve ısı pompası çevriminin $T-s$ diyagramı	88
Şekil 7.2	Paralel akışlı yer ısı değiştiricisinin izometrik şeması	99
Şekil 7.3	Optimum gömme derinliği grafiği	107
Şekil 7.4	Optimum boru çapı grafiği	109
Şekil 7.5	Optimum akış hızı grafiği	110
Şekil 7.6	Zorlanmış toprak sıcaklığı grafiği	113

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Değişik ısı kaynaklarının karşılaştırılması	17
Çizelge 3.1	Pratikte kullanılan boru çaplarının boru uzunluğuna bağlı değerleri	33
Çizelge 3.2	Yer kaynaklı ısı pompalarının yarar ve sakıncaları	46
Çizelge 4.1	Değişik toprak tiplerinin cgs biriminde fiziksel özellikleri	62
Çizelge 4.2	Değişik toprak tiplerinin fph biriminde fiziksel özellikleri	62
Çizelge 5.1	Sulama 2000 programından elde edilen aylık torak yüzeyi sıcaklıkları	64
Çizelge 6.1	$I(x)$ integralinin değerleri	71
Çizelge 6.2	$F(z)$ integralinin değerleri	74
Çizelge 6.3	A toprağına gömülü 1" boru için hesaplanan değerler	76
Çizelge 6.4	B toprağına gömülü 1" boru için hesaplanan değerler	76
Çizelge 6.5	A toprağına gömülü 4" boru için hesaplanan değerler	77
Çizelge 6.6	B toprağına gömülü 1" boru için hesaplanan değerler	77
Çizelge 6.7	Değişik sıcaklık farklarında 1" boru için hesaplanan değerler	78
Çizelge 7.1	Çeşitli derinliklerde maksimum ve minimum toprak sıcaklıkları	87
Çizelge 7.2	1999 yılında ölçülen yaz hava sıcaklıklarının saatlik dağılımları	91
Çizelge 7.3	Mayıs ayı için sistemin sağladığı değerler	92
Çizelge 7.4	Haziran ayı için sistemin sağladığı değerler	93
Çizelge 7.5	Temmuz ayı için sistemin sağladığı değerler	94
Çizelge 7.6	Ağustos ayı için sistemin sağladığı değerler	95
Çizelge 7.7	Eylül ayı için sistemin sağladığı değerler	96
Çizelge 7.8	Yer ısı değiştiricisinde meydana gelen lokal kayıplar	102
Çizelge 7.9	Değişik su sıcaklıkları için hesaplanan değerler	106
Çizelge 7.10	Değişik toprak derinlikleri için hesaplanan değerler	107
Çizelge 7.11	Değişik boru çapları için hesaplanan değerler	108
Çizelge 7.12	Değişik akış hızları için hesaplanan değerler	109
Çizelge 7.13	Düzeltilmiş modül sayısına göre hesaplanan değerler	111
Çizelge 7.14	Etkilenme yarıçapının hesaplanan değerleri	114
Çizelge 7.15	Düzeltilmiş etkilenme yarıçapına göre hesaplanan değerler	115
Çizelge 7.16	1999 yılında ölçülen kış hava sıcaklıklarının saatlik dağılımları	117
Çizelge 7.17	Ekim ayı için sistemin sağladığı değerler	118
Çizelge 7.18	Kasım ayı için sistemin sağladığı değerler	119
Çizelge 7.19	Aralık ayı için sistemin sağladığı değerler	120
Çizelge 7.20	Ocak ayı için sistemin sağladığı değerler	121
Çizelge 7.21	Şubat ayı için sistemin sağladığı değerler	122
Çizelge 7.22	Mart ayı için sistemin sağladığı değerler	123
Çizelge 7.23	Nisan ayı için sistemin sağladığı değerler	124
Çizelge 7.24	Değişik ısı pompası sistemlerinin mukayesesi	129

ÖNSÖZ

1999-2000 döneminin güz Yarıyılında almış olduğum bitirme tezim “Minimum Enerjili Bina Tasarımı (Toprak Enerjisiyle)” konusunu kapsamaktadır. Bitirme tezimi yöneten benden bilgisini ve manevi desteğini eksik etmeyen Sn.Yrd.Doç.Dr.Ahmet KOYUN’ a teşekkürü bir borç bilirim.

Araştırmamın bu konuyla ilgilenecek arkadaşlarıma ve değerli meslektaşlarıma faydalı olmasını dilerim.

Sevgi ve saygılarımla

İstanbul, 2000



Timur DİZ

ÖZET

Toprak kaynaklı ısı pompalarının dizaynının yapılabilmesi için ısı kaynağı veya kuyusu olarak kullanılan toprağın sıcaklığının doğru olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Toprak sıcaklığının, zamana ve derinliğe bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bulunan matematiksel ifadeler kullanım kolaylığı sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. İstanbul Göztepe için toprak sıcaklığının yıl içindeki salınımları hesaplanmıştır. Hesaplanan toprak sıcaklıkları, Meteoroloji Müdürlüğü'nden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Toprak kaynaklı ısı pompalarının dizaynında kullanılan analitik hesaplama yöntemleri tanıtılmıştır. Sabit yüzey sıcaklığı kabulü esas alınarak 30kW soğutma ve 21,5kW ısıtma yüküne sahip bir bina için toprak kaynaklı ısı pompası sistemi dizayn edilmiştir. Hesaplamalarda toprak özellikleri sabit kabul edilmiştir. Isı pompasının çalışma süresi ve ısı pompasının aylık çalışma oranları BIN yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Yer ısı değiştiricileri akış tiplerine göre incelenmiştir. Paralel akışlı sistemlerin, seri akışlı sistemlere nazaran daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. Paralel akışlı yer ısı değiştiricilerinin optimizasyonunu yapmak amacıyla değişik boru çaplarında, gömme derinliklerinde ve akış hızlarında hesaplamalar tekrarlanmıştır. Bulunan sonuçlar, yatırım maliyeti, genel performans katsayıları ve gerekli olan bahçe alanları göz önüne alınarak grafikler halinde gösterilmiştir. Elde edilen bu grafikler vasıtasıyla; sonuç olarak optimum gömme derinliğinin 130-150cm, optimum boru çapının 1" ve optimum akış hızının 0,5 m/s olduğu belirlenmiştir.

Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin işletme ve kurulum maliyetleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar, klasik sistemlerin ve hava kaynaklı ısı pompası sistemlerinin işletme maliyetleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toprak sıcaklığı, çalışma oranı, yer ısı değiştiricileri, işletme maliyeti.

Timur Diz
Mak. Müh.

ABSTRACT

In order to accomplish the design of ground source heat pumps, the temperature of the soil which is used for heat source or sink has to be correctly determined. The change of the temperature of the soil was investigated according to time and depth. The mathematical expressions which were found out were improved for their convenient usage. Annual temperature oscillations of the soil of İstanbul-Göztepe were calculated. The calculated temperatures of the soil were compared with the data obtained from Meteorology Department

The analytical calculation methods used for the design of the ground source heat pump were introduced. Based on constant surface temperature theory, a system of a ground source heat pump for a building which has 30kW cooling and 21.5kW heating load were designed. Properties of the soil were taken constant. The work period and monthly work ratios of heat pump were determined by using BIN method.

The earth heat exchangers were studied according to the flow types. It was shown that parallel flow systems were more advantageous than series-flow systems. In order to optimisation of parallel flow earth heat exchangers, calculations were repeated in various diameters of pipe, burial depths, and flow velocities. Taking the investment cost general performance coefficient and garden area needed in the consideration, the outcomes were plotted in the graphs. By means of these graphs which are obtained, it was determined that the optimum burial depth was 130-150 cm, the optimum pipe diameter was 1'' and the optimum flow rate was 0.5 m/s.

The investment and operating costs of the ground source heat pump were calculated. The results found out were compared with the operating costs of classical and air source heat pump systems.

Keywords: Soil temperature, work ratio, earth heat exchangers, operation cost.

Timur Diz
Mech. Eng.

1.GİRİŞ

Güneş ışınları yeryüzüne ulaştığında, söz konusu ışınlarının bir kısmı; yeryüzüne çarparak atmosfere yansırken, geri kalan kısmı toprak tarafından yutulmaktadır. Yutulan bu enerjiden faydalanma fikri ilk olarak II. Dünya savaşıdan sonra ortaya atılmıştır. Dünyanın enerji dar boğazına girdiği dönemlerde, bu konu her zaman gündeme gelmiş ve konu ile ilgili çalışmalara hız verilmiştir. İlk olarak 1950'lerde Ingersoll, topraktan, borular vasıtasıyla ısı çekilmesinin matematiksel olarak modellenmesi üzerine çalışmış ve Kelvin Çizgisel Kaynak Teorisini kullanarak topraktaki sıcaklık dağılımlarını iyi bir yaklaşıklıkla elde etmiştir. Daha sonra 1955 yılında Jeager ve Carslaw' un çalışmaları sonucu sabit yüzey sıcaklığı kabulünün temel ifadeleri elde edildi. II. Dünya savaşıdan sonra başlayan günümüze kadar devam eden, yarım asrı aşkın süre içerisinde, toprak kaynaklı ısı pompaları ile olarak teknolojinin de gelişmesi ile bağlantılı olarak bir çok çalışma yapılmıştır.

Yer kaynaklı ısı pompalarının dizaynında, toprak içindeki ısı transferinin hesaplanması için; toprağın fiziksel özelliklerine bağlı olarak çok sayıda model tanımlanmış olup, bu modeller analitik ve nümerik yöntemlerle hesaplanmaya çalışılmıştır.

Kalman 1980 yılında ABD'de yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, Kelvin çizgisel kaynak yöntemi üzerine modelini kurarak, bu yöntemin boru cidarındaki dirençlerin hesaplanabilmesi için uygun olduğunu analitik hesap yöntemleri ile göstermiştir.

Vestal 1956 (Vestal ve Fluker 1954) yılında ABD'de yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, analitik hesap yöntemleri ile, çok sayıda deneyden elde edilen dataları birbirleriyle ilişkilendirerek, grafik çözüm yöntemi geliştirmiştir.

Hadley 1949 yılında ABD'de yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, birçok deneyden zamana bağlı olarak elde edilen dataları birbirleriyle ilişkilendirerek bir model oluşturmuştur. Bu model ile Kelvin çizgisel kaynak yaklaşımının çok tutucu bir yaklaşım olduğunu göstermiştir.

Skartredt 1980 yılında ABD'de yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, akışkan ve boruyu bir bütün olarak izotermal kütle olarak modellemiştir. Toprak ise tek bir borunun etrafında 6 ortak merkezli hacim olarak modellenmiştir. Bu çalışmada toprağın özelliklerini sabit varsayılmıştır.

Worsoe ve Schmidt' in 1981 yılında Danimarka'da yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, yer ısı değiştiricisini, komşu yüzeyler arasında termal dirence sahip olan toprağın, izotermal yüzeyleri ile çevrili, ince bir izotermal yüzey olarak modellenmiştir.

Schlosser' in 1978 yılında Avrupa da yaptığı (tek boyutlu) çalışmalarda, yer ısı değiştiricisi, üniform ısı akısına sahip yatay bir levha olarak modellenmiştir. Değişen yüzey koşullarına bağlı olarak günlük salamura miktarının hesaplanmasında kullanışlı bir çalışma yapmıştır. Çözüm tekniği olarak sonlu fark metodunu kullanmıştır.

Claesson ve Johansson' un 1980 yılında Avrupa da yaptıkları (iki boyutlu) çalışmalarda, toprak; silindirik izotermal hacim, yer ısı değiştiricisi; ısı transfer uzunluğu ile karakterize edilerek bir model oluşturulmuştur.

Andrews ve Metz 'in 1979 yılında, Metz' in 1981 yılında ABD'de yaptıkları (iki boyutlu) çalışmalarla bir model oluşturmuşlardır. Bu model TRNSYS bilgisayar programı ile kullanılmaktadır. Bu model, yatay yer ısı değiştiricileri ve gömülü tanklar için dizayn edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi benimsenmiştir. Bu model kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel datalar ile Metz (1979) ve Bose (1981) tarafından karşılaştırılmıştır.

Whitacre'nin 1974 yılında, Holt'un 1976 yıllarında ABD'de yaptıkları (iki boyutlu) çalışmalarda, kutup bölgesindeki toprağa gömülü gaz boru hattının etrafından transfer olan ısı miktarı için bu model dizayn edilmiştir. Bu model yer altı suyunun hareketlerinin analizini içerir. Yer altı suyunun hareketleri sadece hidrolik açıdan incelenmiştir, termal etkiler göz önüne alınmamıştır. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Johansson ve Westman'ın 1979 yılında Avrupa'da yaptıkları (iki boyutlu) çalışmalarda, oluşturdukları model; değişken toprak özellikleri ve donma hesapları için kullanır. Yüzeydeki toprak sıcaklığı; taşınım, radyasyon ve dış hava sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Morgensen'in 1979 yılında Avrupa'da yaptığı (iki boyutlu) çalışmalarda, oluşturduğu modelle toprak özelliklerini; mineral yoğunluğu, kuartz içeriği, kuru yoğunluk, içerdiği nem miktarı ve

sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Yer ısı değiştiricisi etrafındaki toprağın donma hesabı bu modelle yapılabilir. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Neiss ve Winter'in 1977 yılında Avrupa'da yaptıkları (iki boyutlu) çalışmalarda, oluşturdukları model için, toprak özelliklerini sabit olarak kabul edilmiştir. Yüzeydeki toprak sıcaklıkları Claesson (1980) tarafından hazırlanan modele göre hesaplanmıştır. Bu çalışma nem geçişini modellemek için planlanmıştır. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Cube'un 1980 yılında Avrupa'da yaptığı (iki boyutlu) çalışmalarda oluşturduğu modelle, toprak özellikleri zaman ve derinliğin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Topraktaki donma olayı bu çalışmada hesaplanmıştır. Bu model, minimum yer ısı değiştiricisi mesafesi 2,5ft (0,8m) ve 0,5-3,5ft (0,5-1m) değerlerindeki optimum derinliği hesaplamak gibi temel dataların oluşturulmasında kullanılmıştır. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Atkinson'un 1978 yılında Kanada'da yaptığı (iki boyutlu) çalışmalarda, oluşturduğu modelle; değişken nem miktarını, derinliğin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Bu model, donma hesaplarını içerir ve yüzeyin karla kaplı olması durumunu kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Whitacre'nin 1972 yılında, ABD'de yaptığı (iki boyutlu) çalışmada, daha önce bahsedilen modeli sonlu fark yöntemi ile ele almıştır.

Nievergeld'in 1979 yılında Avrupa'da yaptığı (iki boyutlu) çalışmada oluşturduğu modelde sabit toprak özelliklerini kullanır. Isı transferi ve ısı pompası için oluşturulan modeller Cube (1980)'de oluşturduğu modele benzerlikler göstermektedir. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Nievergeld'in 1979 yılında Avrupa'da yaptığı (iki boyutlu) çalışmada oluşturduğu model; daha önce bahsedilen tek boyutlu sonlu fark modeline benzerdir. Bu model, çoklu yatay ve düşey yer ısı değiştiricisi sistemlerinin dizaynını karşılayacak niteliktedir ve donma hesaplamalarını içerir. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Landes ve Haslbeck'in 1979 yılında Almanya'da yaptığı (üç boyutlu) çalışmada oluşturduğu model; yatay yer ısı değiştiricisi için levha konseptini kullanarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada levha yüzeyinin sıcaklığı, salamura sıcaklığına eşit kabul edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark yöntemi esas alınmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların dışında, Partin 1985 yılında yaptığı çalışmasında, ısı pompaları için kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricisi üzerine çalışmalar yaptı ve belirli bir toprak kütlesi için toplam ısı iletkenliğinin ölçülmesi ile ilgili olarak bir yöntem verdi. Safemazandarani, 1990 yılında doğrudan genleşmeli toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin performansını simüle edilebilmesi için matematiksel bir model geliştirdi. Mei ve Baxter 1990 yılında doğrudan genleşmeli toprak ısı değiştiricisinin bazı yarar ve sakıncalarını deneysel olarak belirledi. Kavanaugh, 1998 yılında bilinen yer kaynaklı ısı pompalarının bağlantı elemanları ve boru hatlarındaki basınç kayıpları ile ilgili diyagramları vererek, boru hattının tasarımını inceledi.

Konu ile ilgili olarak ülkemizde İ.T.Ü ve O.D.T.Ü' lerinde iki adet yüksek lisans tezi hazırlanmıştır. H. Ataman (İ.T.Ü) 1985 yılında Kelvin çizgisel kaynak teorisini kullanarak, İstanbul Göztepe'deki bir binanın toprak kaynaklı ısı pompası ile ısıtılmasını ele almıştır. N. Babür ise 1986 yılında O.D.T.Ü bünyesinde yer alan 5/8" boru çaplı yaklaşık olarak 10m'lik bir yer ısı değiştiricisindeki ısı transferi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmış ve elde edilen sonuçları, Kelvin çizgisel kaynak metoduyla elde edilen değerlerle karşılaştırmıştır.

Yer kaynaklı ısı pompalarının tesisinde, toprağın yıl içindeki sıcaklık dalgalanmaları ve diğer fiziksel özelliklerinin doğru olarak tespit edilmesi gerekir. Ülkemizde Meteoroloji Müdürlüğü'nce yapılan ölçümler yalnız 1m derinliğe kadar yapılmaktadır. Bu bağlamda 1m'den daha derine gömülecek bir yer ısı değiştiricisinin dizaynında toprak sıcaklıklarının bilinmesi için bir hesaplama yöntemine ihtiyaç vardır. Bu ihtiyacı karşılamak amacı ile tezimizde toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı olarak tespit edilmesine çalışılacaktır.

Tezimizde sabit yüzey sıcaklığı kabulü esas alınarak topraktaki ısı transferi incelenecek ve optimum boru çapı, akış hızı ve gömme derinliği tespit edilmeye çalışılacaktır. Toprak kaynaklı bir ısı pompası, hem soğutma hem de ısıtma amaçlı olarak dizayn edilecektir. Sistemin yatırım ve işletme maliyetleri incelenerek diğer bazı sistemlerle işletme giderleri ve enerji tüketimi göz önüne alınarak bakımından karşılaştırılarak sistemin ekonomik olarak kullanılabilirliği incelenecektir.

2. ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR

2.1 Carnot ve Ters Carnot Çevrimleri

Isı makineleri bir çevrim gerçekleştirerek çalışırlar ve aracı akışkan her çevrim sonunda ilk haline dönmektedir. Çevrimin bir bölümünde aracı akışkanın üzerine iş yapılırken, diğer bir bölümünde ise aracı akışkan iş yapar. İkisi arasındaki fark ısı makinesinin net işidir. Isı makinesi çevriminin verimi büyük ölçüde çevrimi oluşturan hal değişimlerinin nasıl gerçekleştiğine bağlıdır. Net iş ve buna bağlı olarak çevrimin ısı verimi, en çok iş yapılan ve en az iş yapılmasını gerektiren hal değişimlerini, başka bir deyişle tersinir hal değişimlerini kullanarak en yüksek verimlere çıkarılabilir. Tümünüyle tersinir hal değişimlerinden oluşan tersinir çevrimler, en yüksek verime sahiptir.

Tersinir çevrimlere gerçek uygulamalarda rastlanmaz, çünkü gerçek hal değişimlerindeki tersinmezlikler yok edilemez. Fakat tersinir bir çevrimin verimi, gerçek çevrimlerin ulaşacakları en yüksek verimi belirler. Aynı zamanda tersinir çevrimler, gerçek çevrimlerin gerçekleştirilmesi aşamasında başlangıç noktalarını oluştururlar.

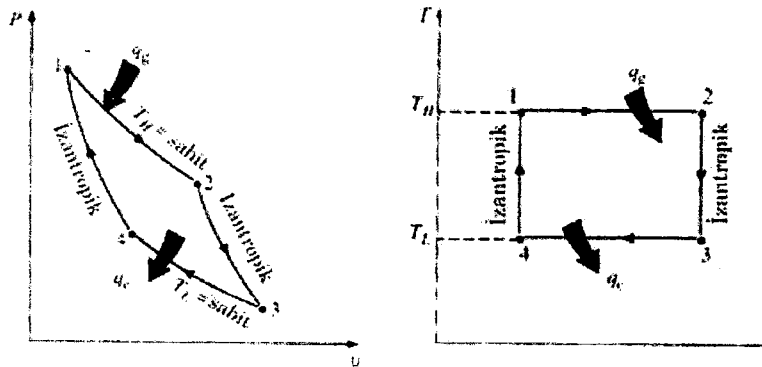
1824 yılında Fransız mühendis ve bilim adamı olan Sadi Carnot tarafından ortaya atılan Carnot çevrimi, en çok bilinen tersinir çevrimdir. Carnot çevrimi, ikisi sabit sıcaklıkta, ikisi de adyabatik olmak üzere dört hal değişiminden oluşur.

1-2 Tersinir sabit sıcaklıkta genişleme

2-3 Tersinir adyabatik genişleme

3-4 Tersinir sabit sıcaklıkta sıkıştırma

4-1 Tersinir adyabatik sıkıştırma

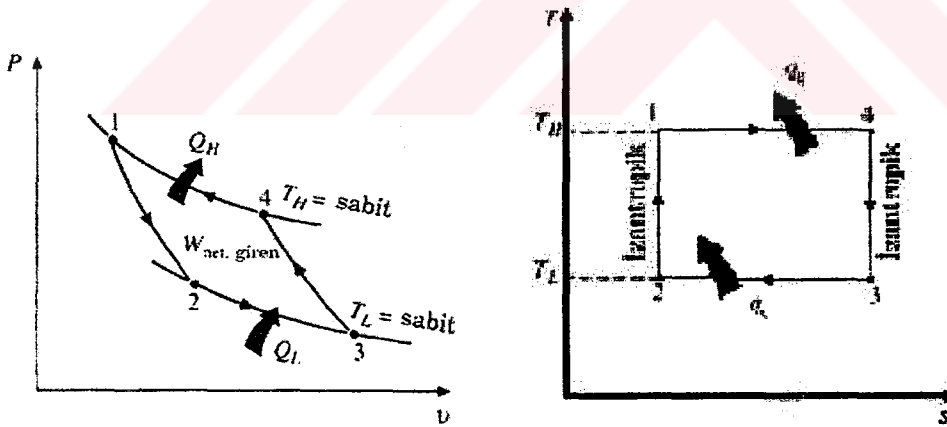


Şekil 2.1 Carnot çevriminin $P-v$ ve $T-s$ diyagramı

Bu çevrimin $P-v$ ve $T-s$ diyagramı şekil 2.1’de gösterilmiştir. $P-v$ diyagramında sanki-dengeli (içten tersinir) bir hal değişimi sırasında yapılan sınır işi, hal değişimi eğrisi altında kalan alandır. Bu nedenle 1-2-3 eğrisi altında kalan gazın genişleme sırasında yaptığı iş, 3-4-1 kalan alan ise gazı sıkıştırmak için yapılması gereken alanı simgelemektedir. Çevrimin hal değişimi eğrilerinin kapsadığı alan, bu ikisi arasındaki farktır ve çevrim sırasında yapılan net işi göstermektedir.

Tersinir bir çevrim olan Carnot çevrimi, verilen iki sıcaklık sınırı arasında en yüksek verime sahip olan çevrimdir. Carnot çevrimi uygulamada gerçekleştirilemez, fakat gerçek çevrimlerin verimlerini Carnot çevriminin verimleriyle karşılaştırmak ve gerçek çevrimlerde buna göre iyileştirmeler yapmak mümkündür.

Yukarıda açıklanan Carnot ısı makinesi çevrimi tümten tersinir bir çevrim olduğundan, çevrimi oluşturan tüm hal değişimleri ters yönde gerçekleşebilir. Bu durumda elde edilen çevrime “Carnot Soğutma Çevrimi” veya “Ters Carnot Çevrimi” adı verilir. Bu çevrimde ısı ve iş etkileşimlerinin yönü değişmektedir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposundan, Q_L miktarına ısı alınmakta, yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposuna Q_H miktarında ısı verilmektedir. Bu çevrimi gerçekleştirmek için ayrıca sistem üzerine iş yapılmaktadır. Şekilde çevrimin $T-s$ ve $P-v$ diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Ters Carnot çevriminin $P-v$ ve $T-s$ diyagramı

Ters Carnot çevrimi, belirli sıcaklıklardaki iki ısı enerji deposu arasında çalışan en etkin soğutma çevrimidir. Soğutma makineleri ve ısı pompaları için ideal çevrim olarak önce Carnot çevriminin incelenmesi gerekir. Uygulanabilir olması durumunda Carnot çevriminin ideal çevrim olarak seçilmesi gerekir. Fakat aşağıda sıralanan nedenlerle bu çevrimin uygulamada gerçekleştirilmesi olanaksızdır (Çengel ve Boles, 1996).

Isı geçişinin olduğu iki izotermal hal değişimi uygulamada gerçekleşebilir, çünkü doyma bölgesinde basıncın sabit kalması sıcaklığında sabit kalmasını sağlar. Dolayısıyla 1-2 ve 3-4 buharlaştırıcı ve yoğuştıruculardaki gerçek duruma yakındır. Fakat 2-3 ve 4-1 hal değişimlerinin uygulamada gerçekleştirilmesi zordur. Çünkü 2-3 hal değişimi bir sıvı buhar karışımının sıkıştırılmasını başka bir deyişle iki fazlı akışkan çalışan bir kompresörü gerektirir. 4-1 hal değişimi ise sıvı oranı yüksek bir karışımın genişlemesidir. Bu sorunların, Carnot çevrimini doyma bölgesinin dışında gerçekleştirerek çözüleceği düşünülebilir, fakat bu kez de ısı geçişi işlemlerinde sabit sıcaklık koşulunun yerine getirilmesi zorluk çıkaracaktır.

Bu nedenlerden ötürü ters Carnot çevrimi uygulamada gerçekleştirilemez. Bununla birlikte ters Carnot çevrimi, gerçek soğutma çevrimlerinin karşılaştırılabileceği bir standart oluşturur.

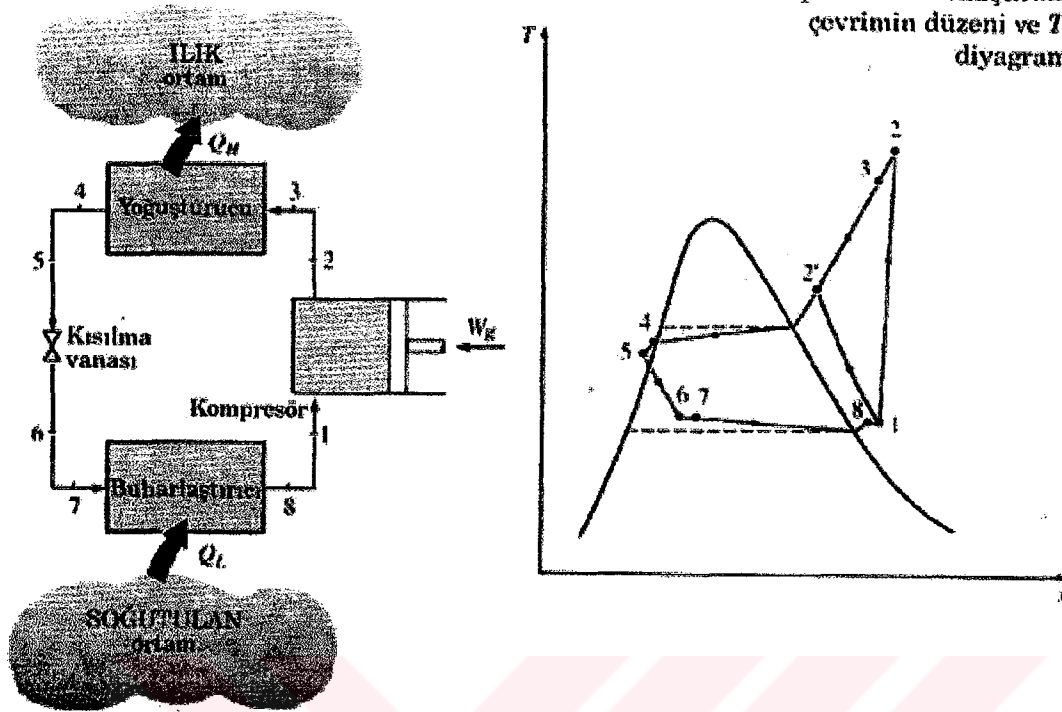
2.2 İdeal Buhar Sıkıştırırmalı Soğutma Çevrimi

Ters Carnot çevriminin uygulanmasındaki güçlükler, buharı sıkıştırmadan önce tümüyle buharlaştırarak ve 4-1 hal değişimindeki genişlemeyi bir kısılma işlemi ile gerçekleştirerek aşılabılır. Bu şekilde elde edilen çevrim “ideal buhar sıkıştırırmalı çevrim” olarak bilinir. Bu çevrimin genel çizimi ve $T-s$ diyagramı şekil 2.3’te verilmiştir. Bu çevrimi oluşturan hal değişimleri şöyledir.

- 1-2 Kompresörde izantropik sıkıştırma
- 2-3 Yoğuştırucuda sabit basınçta çevreye ısı geçişi
- 3-4 Kısılma (genişleme ve basıncın düşmesi)
- 4-1 Buharlaştırıcıda akışkana sabit basınçta ısı geçişi

İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminde, soğutucu akışkan kompresöre 1 halinde doymuş olarak girer ve izantropik olarak yoğuştırucu basıncına sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi sırasında soğutucu akışkanın sıcaklığı çevre ortam sıcaklığının üzerine çıkar. Soğutucu akışkan daha sonra 2 halinde kızgın buhar olarak yoğuştırucuya girer ve yoğuştırucudan 3 halinde doymuş sıvı olarak ayrılır. Yoğuşma sırasında çevreye ısı geçişi olur. Soğutucu akışkanın sıcaklığı 3 halinde de çevre ortam sıcaklığının üzerindedir.

Doymuş sıvı halindeki akışkan daha sonra bir genişleme vanası veya kılcal borulardan geçirilerek buharlaştırıcı basıncına kısıılır. Bu hal değişimi sırasında soğutucu akışkanın sıcaklığı soğutulan ortamın sıcaklığının altına düşer. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıya 4



İdeal çevrimde, buharlaştırmacıdan çıkan soğutucu akışkan kompresöre doymuş buhar halinde girer. Bu koşul uygulamada gerçekleştirilemez, çünkü soğutucu akışkanın halini hassas bir şekilde kontrol etmek olanaksızdır. Bunun yerine sistem soğutucu akışkanın kompresör girişinde biraz kızgın buhar olmasının sağlayacak biçimde tasarlanır. Burada amaç, akışkanın kompresöre girişinde tamamen buhar olmasını güvenceye almaktır. Ayrıca buharlaştırmacı ile kompresör arasındaki bağlantı genellikle uzundur, böylece akış sürtünmesinin yol açtığı basınç düşmesi ve çevreden soğutucu akışkana olan ısı geçişi önem kazanabilir. Yukarıda sıralanan etkilerin toplam sonucu, soğutucu akışkanın özgül hacminin ve buna bağlı olarak kompresör işinin artmasıdır. Çünkü sürekli akış işi özgül hacimle doğru orantılıdır.

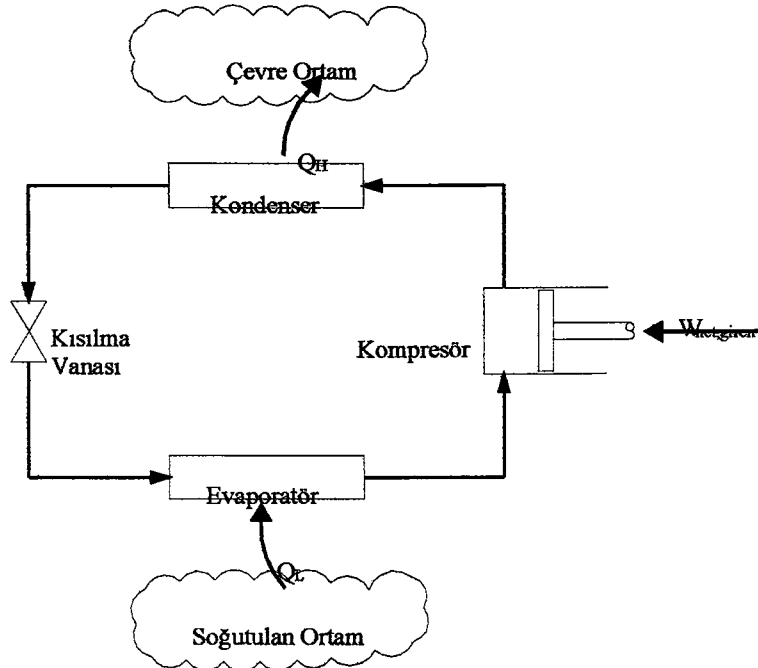
İdeal çevrimde sıkıştırma işlemi içten tersinir ve adyabatiktir, başka bir deyişle izantropiktir. Gerçek sıkıştırma işleminde ise, entropiyi etkileyen akış sürtünmesi ve ısı geçişi vardır. Sürtünme entropiyi artırırken ısı geçişi ise hangi yönde olduğuna bağlı olarak entropiyi artırır veya azaltır. Bu iki etkiye bağlı olarak soğutucu akışkanın entropisi sıkıştırma işlemi sırasında artabilir (1-2 hal değişimi) veya azalabilir (1-2' hal değişimi). Sıkıştırmanın izantropik olmaktansa, 1-2' hal değişimine göre olması tercih edilir, çünkü kompresör işi bu durumda daha az olacaktır. Bu bakımdan soğutucu akışkanın sıkıştırma işlemi sırasında soğutulması ekonomik ve uygulanabilir olduğu sürece yararlıdır. (Çengel ve Boles, 1996)

İdeal çevrimde, soğutucu akışkanın yoğuşturucudan çıkış hali, kompresör çıkış basıncında doymuş sıvıdır. Gerçek çevrimde ise kompresör çıkışı ile kısılma vanası girişi arasında belirli bir basınç düşüşü vardır. Akışkanın kısılma vanasına girmeden önce tümüyle sıvı halde olması istenir. Doymuş sıvı halini uygulamada tam bir hassasiyetle gerçekleştirmek zor olduğundan, yoğuşturucudan çıkış hali genellikle sıkıştırılmamış sıvı bölgesindedir. Soğutucu akışkan doyma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa soğutulur, başka bir deyişle aşırı soğutulur. Bunun bir sakıncası yoktur, çünkü bu durumda soğutucu akışkan buharlaştırıcıya daha düşük bir entalpide girer ve buna bağlı olarak ortamdan daha çok ısı çekilebilir. Kısılma vanası ile buharlaştırıcı birbirine çok yakındır, dolayısıyla aradaki basınç düşüşü küçüktür.

2.4 Soğutma Makineleri ve Isı Pompaları

Isı geçişinin her zaman sıcaklığın azaldığı yönde olduğu bilinen bir gerçektir, bir başka deyişle, ısı geçişi yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama olur. Bu doğal bir olgudur ve kendiliğinden gerçekleşir. Düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi ancak soğutma makinelerinin kullanımı ile olanaklıdır.

Soğutma makineleri bir çevrim esasına göre çalışır ve soğutma çevriminde kullanılan akışkana “soğutucu akışkan” adı verilir. En yaygın kullanılan soğutma çevrimi buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimidir ve şekil2.5’te gösterilen dört elemanla gerçekleşir; kompresör, kondenser, kısılma vanası ve evaporatör.



Şekil 2.5 Soğutma çevrimi ve elemanları.

Soğutucu akışkan kompresöre buhar olarak girer ve burada kondenser basıncına sıkıştırılır. Kompresör çıkışında kızgın buhar halinde olan akışkan çevre ortama ısı vererek soğur ve yoğunlaşır. Akışkan kondenserdan sonra kılcal borulara girer ve kısılma etkisiyle basıncı ve sıcaklığı büyük ölçüde azalır. Soğutucu akışkan daha sonra evaporatörde soğutulan ortamdan ısı alarak buharlaşır. Çevrim, buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın kompresöre girmesi ile tamamlanır. Bir soğutma makinesinin genel çizimi şekil 2.5’de gösterilmiştir. Burada Q_L , T_L sıcaklığındaki soğutulan ortamdan çekilen ısıyı göstermektedir. Q_H ise T_H sıcaklığındaki ılık ortama verilen ısıyı simgelemektedir. $W_{net, giren}$, soğutma makinesine girilen net iştir.

Bir soğutma makinesinin verimi “etkinlik katsayısı” ile ifade edilir ve COP_{SM} ile gösterilir. Soğutma makinesinin amacı soğutulan ortamdan ısı çekmektir (Q_L). Bu amacı gerçekleştirmek için iş yapılması gerekir ($W_{net, giren}$). Bu durumda soğutma makinesinin etkinlik katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$COP_{SM} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} = \frac{Q_L}{W_{net, giren}} = \frac{m_R(h_1 - h_4)}{m_R(h_2 - h_1)} \quad (2.1)$$

Bir çevrim için enerjinin korunumu ilkesi

$$W_{net, giren} = Q_H - Q_L \quad (2.2)$$

olduğundan, soğutma makinesinin etkinlik katsayısı,

$$COP_{SM} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (2.3)$$

şeklinde de yazılabilir. COP_{SM} değeri birden büyük olabilir. Başka bir deyişle, soğutulan ortamdan çekilen ısı, bunu sağlamak için yapılması gereken işten daha büyük olabilir.

Düşük sıcaklıkta bir ortamdan yüksek sıcaklıkta bir ortama ısı enerjisi aktaran bir başka makine de şekil 2.6’da gösterilen ısı pompasıdır. Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler, fakat kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimi tamamlamak için yapılması zorunlu bir işlemdir fakat amaç değildir. Isı pompasının amacı ise bir ortamı sıcak

tutmaktır. Bu işlevi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ortam ise bir evin içidir.

Isı pompasının etkinliği de "etkinlik katsayısı", COP_{IP} ile ifade edilir.

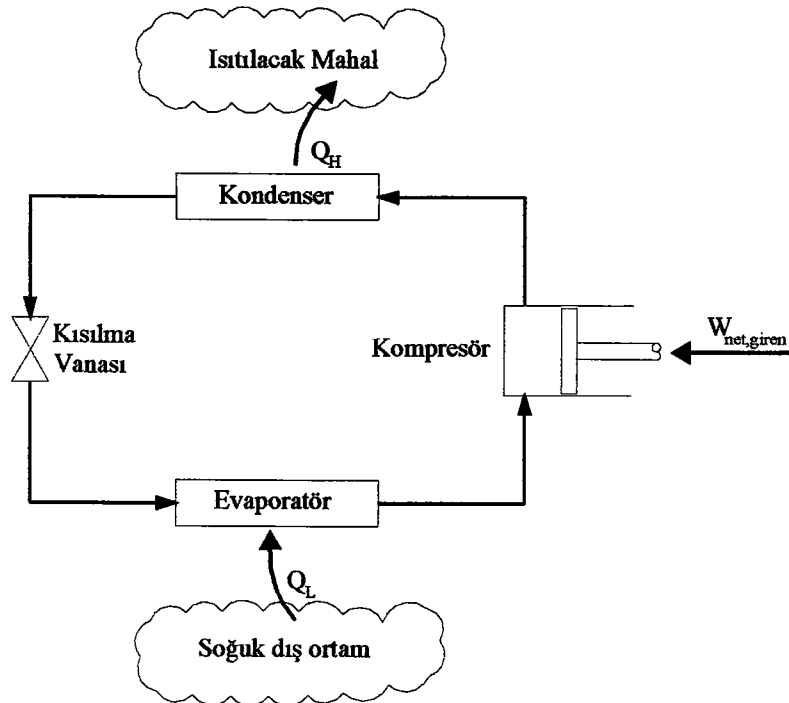
$$COP_{IP} = \frac{\text{elde edilmek istenen değer}}{\text{harcanması gereken değer}} = \frac{Q_H}{W_{net,giren}} = \frac{m_R(h_3 - h_1)}{m_R(h_3 - h_2)} \quad (2.4)$$

$$COP_{IP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (2.5)$$

(2.3) ve (2.5) numaralı denklemler karşılaştırıldığı zaman, Q_H ve Q_L değerleri her iki çevrimde de eşit olmak koşuluyla aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$COP_{IP} = COP_{SM} + 1 \quad (2.6)$$

Bu sonuç ısı pompasının etkinlik katsayısını her zaman birden büyük olduğunu göstermektedir, çünkü COP_{SM} her zaman artı değere sahiptir. Başka bir deyişle, en kötü durumda bile ısı pompası bir elektrikli ısıtıcı gibi çalışacak, tükettiği kadar elektrik enerjisini eve ısı olarak aktaracaktır. Bugün kullanılan ısı pompalarının mevsimlik ortalama COP değerleri 2 ile 3 arasındadır (Çengel ve Boles, 1996).



Şekil 2.6 Isı pompası çevrimi ve elemanları.

2.5 Isı Kaynakları

Yüksek ısı enerjisi sığasına sahip, başka bir deyişle kütlesiyle özgül ısısının çarpımı çok yüksek olan cisimlere ısı enerjisi deposu denir. Doğada da ısı enerjisi deposu kavramını andıran örnekler vardır. Denizler, göller, toprak, akarsu ve çevremizdeki hava, çok büyük olan kütleleri nedeniyle birer ısı enerjisi deposu olarak algılanabilir. (Çengel ve Boles, 1996)

Isı pompalarında hava, su, toprak ve güneş enerjisi olmak üzere başlıca dört kaynaktan yararlanılır. Bunlardan ilk üçü tek başlarına kullanılabilirle beraber, güneş enerjisi genellikle yardımcı kaynak olarak kullanılmaktadır.

2.5.1 Hava

Hava ısı pompası için universal, ucuz, bol bir ısı kaynağıdır. Bu yüzden tüm ülkelerde kullanılır. En büyük avantajları, sürekli bulunmasından başka, geniş bir uygulama alanının bulunması; kullanılan ekipmanların makul boyutlarda olması ve nispeten düşük işletme ve tesis maliyetleri gerektirmeleridir. Ayrıca tasarımı için, çok geniş ve ayrıntılı bilgi kaynakları mevcuttur. Hava kaynaklı ısı pompasının iki büyük dezavantajı vardır:

2. Hava sıcaklığının çok değişken olması

2. Buzlanma problemi

Isı ihtiyacımızın yüksek olduğu anlarda kaynak sıcaklığı da düşüktür. Bu da, ısı pompasının ısıtma kapasitesinin düşmesine neden olur. Bu durumda genellikle ek bir ısıtma kaynağına gerek duyulur. Isı kaynağı sıcaklığının çok değişken olması projelendirmeyi ve ekipman seçimini de zorlaştırır. (Ataman,1985)

Hava kaynaklı ısı pompalarında, buharlaştırıcıda ısı geçişini sağlamak amacıyla, kaynak sıcaklığı ile soğutucu akışkan sıcaklığı arasında genellikle 10°C civarında bir fark olur. Buharlaştırıcı yüzey sıcaklığı 0°C' nin altına düştüğünde, hava içinde bulunan su buharı buharlaştırıcı yüzeyleri üzerinde yoğunlaşarak buzlanmaya sebep olur. Buzun, buharlaştırıcı yüzeyleri üzerinde uzun süre birikmesine müsaade edildiği takdirde ısı geçişi engellenir. Bu durum ısı pompası ısıtma tesir katsayısı ve kapasitesinin düşmesine neden olur.Yapılan araştırmalar, buz birikiminin 9.8-14.6 kg/m² değerine kadar ısı geçişini arttırıcı yönde rol

oyunadığını göstermektedir. Ancak daha fazla birikmeyi engellemek için, buzun periyodik olarak buharlaştırıcı yüzeylerinden çözülmesi gerekmektedir. Hava kaynaklı ısı pompalarında bir başka problem de, buharlaştırıcıda ısı geçişinin düşük olmasıdır. Bu yüzden ısı geçişini arttırmak amacıyla genellikle genişletilmiş yüzeylerden ve fanlardan yararlanılır. Hava-Hava ısı pompalarında buharlaştırıcı yüzeyleri, yoğunlaştırıcı yüzeylerinden daha büyüktür ve buharlaştırıcı yüzeylerinden geçirilen hava debisi de yoğunlaştırıcı yüzeylerinden geçirilen hava debisinden %50-100 oranlarında daha fazladır.

2.5.2 Su

Kuyulardan, göllerden, nehirlerden, şehir şebekesinden elde edilen su, ısı kaynağı olarak kullanılabilir.

Kuyu suyu 45-150 metre derinlikte ve kuzey ülkelerinde yaklaşık 10°C, güney ülkelerinde ise 16°C sıcaklıklarda elde edilebilir. Yıl boyunca su sıcaklığının fazla değişmemesi büyük bir avantajdır. Göl, nehir, ve benzeri yer üstü sularında ise sıcaklık yıl boyunca kuyu sularına göre daha fazla değişmekle beraber, bu değişim havada olduğu kadar fazla değildir. Ülkemizde yer üstü sularının sıcaklığını genellikle 0°C' nin altına düşmemesi de ayrıca bir avantajdır.

Kuyu suyundan yararlanıldığında, sıcaklığı düşmüş olarak buharlaştırıcıyı terk eden suyun kaynak sıcaklığını düşürmemesi için, genellikle bir daha kullanılmamak üzere bir başka yere atılması gerekmektedir. Ayrıca kuyu suyundan yararlanabilmenin bir başka şartı da yüksek debilerde su elde etmenin mümkün olmasıdır. Dolayısıyla suyun bir defa kullanılması ve büyük miktarlarda gerekmesi, kuyu suyundan yararlanma olanaklarını kısıtlar. Ayrıca arazide yeterli derecede ve uygun özelliklerde suyun bulunmasının belirsizliği, sondaj ve bakım maliyetinin yüksek olması, ısı kaynağı olarak kuyu suyunun kullanılmasını olumsuz yönde etkilemektedir.

Tüm olumsuzluklara rağmen suyu kaynak olarak kullanmanın bir başka avantajı da, ısı değiştiricilerinde ısı geçişinin daha fazla olmasıdır.

Kaynak olarak su kullanıldığı takdirde, kullanılan suyun kalitesi de önemlidir. Su kalite testi yapılmalı ve içerdiği minerallerin başta korozyon tehlikesi olmak üzere kullanılan boru malzemesine etkileri incelenmelidir (Ataman, 1985).

2.5.3 Toprak

Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması hava ve su kaynaklı sistemlere nazaran daha pahalıdır. Toprak altına gömülen boru sistemine “toprak ısı değiştiricisi” denir. Bu borular vasıtasıyla; toprağın ısısı, ısı taşıyıcı akışkana veya çevrimin atık ısısı ısı taşıyıcı akışkandan toprağa aktarılır. Toprak altına gömülen borularda ısı taşıyıcı akışkan olarak; doğrudan soğutucu akışkan veya su ve antifriz karışımı geçirilir. Toprağa gömülü boruların içinde doğrudan soğutucu akışkan kullanmak; soğutucu akışkan ihtiyacının artmasına sebep olur. Buna bağlı olarak soğutucu akışkanın pahalı olması sebebiyle, genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak boru içerisinde, su ve antifriz karışımı kullanılmaktadır.

Toprak ısı değiştiricileri; yatay ve dikey olmak üzere iki şekilde yerleştirilirler. Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği toprak ısı değiştiricisinin seçimini ve boyutlandırmasını etkiler. Toprak özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi ve ayrıca ısı pompası sisteminin çalışması sırasında boruların etrafında belirli bir bölgede ısı alışverişinden dolayı toprak özelliklerinin değişmesi tasarım aşamasında, ilgili hesaplamaların yapılmasını güçleştirir. Isı pompası ısıtma sezonunda kullanıldığında, toprak ısı değiştiricisine yakın bölgelerde toprağın ısısı suya aktarıldığından toprak sıcaklığı düşer. Dolayısıyla bu bölgede nem miktarı ve toprak özellikleri değişir. Isı taşıyıcı akışkanın buharlaştırıcıya giriş sıcaklığı da aynı sebepten ötürü düşer, dolayısıyla ısı pompası kapasitesi ve ısıtma tesir katsayısı doğrudan etkilenir. Soğuk yörelerde, ısıtma yapıldığı süre içerisinde toprağa yeteri kadar ısı girişi olmazsa; kış aylarında topraktan sürekli çekilen ısı nedeniyle, toprağın donma tehlikesi mevcuttur.

Ancak ısı kaynağı olarak toprağın, havaya göre genellikle daha uygun sıcaklıklara sahip olması ve sıcaklık değişiminin daha stabil olması avantajıdır. Ayrıca, salamura-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerinin, hava-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerine göre daha az bir sıcaklık farkında çalışabilmeleri, toprak kaynaklı ısı pompalarının hava kaynaklı ısı pompalarına göre bir diğer avantajıdır.

Toprak kaynaklı ısı pompaları, buharlaştırıcısında topraktan çekilen ısıyı kullanan ısı pompalarıdır. Toprakla olan ısı alışverişi, toprağa yatay veya dikey olarak gömülmüş toprak ısı değiştiricileri ile sağlanır. Isı taşıyıcı akışkan toprak ısı değiştiricisini oluşturan borulardan geçirilmesiyle elde edilen ısı enerjisi ısı pompasındaki buharlaştırıcı da soğutucu akışkana aktarılır. Toprak ısı değiştiricisinin uygun derinliğe gömülmesi belirli bir miktarda hafriyat

veya delme gideri gerektirerek ilk yatırım maliyetinin artmasına sebep olur. Bunun yanı sıra kullanılması halinde yatay toprak ısı değıştiricisinin belirli bir bahçe alanı gerektirmesi toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin kullanımını kısıtlayan bir diğerk faktördür (Ataman,1985).

2.5.4 Güneş

Isı kaynağı olarak güneş enerjisinden yararlanmanın en önemli avantajı; ısı pompası buharlaştırıcı sıcaklığının yüksek seçilebilmesine imkan vermesidir. Dolayısıyla ısıtma tesir katsayısı yükseltilmiş olur. Güneş enerjisinden yararlanan ısı pompası sitemleri, daha düşük toplayıcı sıcaklıklarında çalıştıklarından, toplayıcı verimi diğerk güneş enerjisini kaynak olarak kullanan sistemlerde olduğundan daha yüksektir.

Kaynak olarak güneş enerjisinden yararlanıldığında iki temel sistem söz konusudur. Bunlar ; doğrudan güneş enerjisinden faydalanan sistemler ve dolaylı olarak güneş enerjisinden faydalanan sistemlerdir. Doğrudan güneş enerjisinden faydalanan sistemlerde toplayıcılar buharlaştırıcı vazifesini görür. Dolaylı olarak güneş enerjisinden faydalanan sistemlerde ise toplayıcıdan su veya su buharı geçirilerek kaynak olarak bunlardan faydalanılır.

Ancak, hava kaynağında olduğu gibi, ısı ihtiyacının yüksek olduğu günlerde güneş enerjisi de kısıtlı olduğundan ek bir ısıtma tesisatına veya ısının depolanması gerekliliğini ortaya çıkarır. Bu da zaten pahalı olan sistem maliyetinin daha da artmasına neden olur.

Bunun yanı sıra ulaşım sorunu olmayan, kaliteli ve çevreye zararı olmayan sağlıklı bir enerji kaynağı olarak güneş, mimari ve mühendislik bir takım yaklaşımlarla oluşturulan pasif sistemler vasıtasıyla konutların ısı ihtiyacının azaltılmasını sağlayarak bütün diğerk ısı pompası sitemlerine destek olmaktadır.

Prensipte, güneş enerjinin büyük bir kısmının jeokütle tarafından tutulduğu ve diğerk kısmının havanın bünyesinde barındırıldığı düşünülürse, dolaylı olarak da olsa dahi güneş enerjisi tüm diğerk ısı kaynaklarına temel oluşturduğu kabul edilebilir. Gelecekte malzeme bilimi yardımıyla gelişecek olan enerji depolama sistemleri vasıtasıyla ısı kaynağı olarak güneş enerjisi çok daha yaygınlaşacaktır (Ataman,1985).

Çizelge 2.1’ de yukarıda bahsedilen ısı kaynaklarının karşılaştırılması özet halde verilmiştir. Isı kaynaklarının temel özelliklerinin belirtilmesi amacıyla yapılan bu karşılaştırma sadece kaynakların kullanılabilirliği, kullanma alanları, ilk yatırım masrafları, işletme giderleri, gerektirdikleri ekipman boyutları ve yaygınlıklarına göre yapılmıştır. Karşılaştırma sahalarının genişletilmesi mümkündür.

Çizelge 2.1 Değişik ısı kaynaklarının karşılaştırılması.

ISI KAYNAĞI	HAVA	SU			TOPRAK	GÜNEŞ ENERJİSİ
		ŞEHİR SUYU	KUYU SUYU	YÜZEY SUYU		
Kaynak Sınıflandırılması	Birincil	Birincil veya Yardımcı	Birincil	Birincil	Birincil veya Yardımcı	Yardımcı
Isı Atılması için Uygunluk	İyi	İyi	İyi	İyi	Genellikle Zayıf	Isıyı havaya atmada kullanılabilir
Bulunabilirlik (Yöre)	Üniversal	Şehirler	Belirsiz	Nadir	Yaygın	Üniversal
Bulunabilirlik (Zaman)	Sürekli	Yöresel kesintiler haricinde sürekli	Sürekli	Sürekli	Sürekli	Sürekli
İlk Yatırım Masrafları	Düşük	Genellikle en düşük	Kuyu açmanın maliyetine göre değişken	Düşük	Değişken	Yüksek
İşletme Masrafları	İzafi olarak Düşük	Yüksek	Düşük-Orta	İzafi olarak Düşük	İzafi olarak Orta	Yardımcı kaynak olarak işletme maliyetlerini düşürür.
Sıcaklık Seviyesi	Uygun	Genellikle tatmin edici	Tatmin edici	Tatmin edici	Aşırı miktarlarda ısı çekilmediği sürece iyi	Çok iyi
Sıcaklık Değişimi	Aşırı	Yöreye göre değişken	Düşük	Orta	Derinliğe göre değişmekte ancak havadan düşük	Aşırı
Dizayn Mahuratu	Genellikle elverişli	Genellikle elverişli	Genellikle elverişli	Genellikle elverişli	Elverişsiz	Pratik olarak mümkün
Ekipmanların Boyutları	Orta	Küçük	Kuyu ekipmanları haricinde küçük	Küçük	Toprak ısı değiştiricileri haricinde küçük	Sadece bazı yöreler için elverişli
Standart sistemlere uyum	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Zayıf	Zayıf

2.6 Isı Pompasında Kullanılan Soğutucu Akışkanlar

Bir soğutma sistemini tasarlarken kullanılacak birçok soğutucu akışkan vardır. Bunlar arasında Freonlar veya cloroflorokarbonlar (CFC), amonyak , propan , etan , etilen gibi hidrokarbonlar, karbondioksit, uçakların iklimlendirilmesinde kullanılan hava ve donma noktasının üzerindeki bazı uygulamalarda kullanılan su sayılabilir. Yukarıda belirtilen soğutucu akışkanlardan freonlar piyasada kullanılan soğutucu akışkanların en büyük bölümünü oluşturur.

Soğutucu akışkan seçiminde etkili olan iki parametre, soğutucu akışkanın, ısı alışverişinde bulunduğu iki ortamın, baka bir deyişle soğutulan ortamın ve çevrenin sıcaklıklarıdır. Birim zamanda yeterli ısı geçişini sağlayabilmek için soğutucu akışkanla, ısı alışverişi bulunduğu ortam arasında 5-10°C kadar bir sıcaklık farkının bulunması gerekir.

Bir soğutma çevriminde en düşük basınç, buharlaştırıcıda gerçekleşir ve çevrime hava sızmasını önlemek için bu basıncın atmosfer basıncının üzerinde olması gerekir.

Yoğuşturucuda, soğutucu akışkanın sıcaklığı ve böylece basıncı ısı verilen ortamın sıcaklığı ile belirlenir. Yoğuşturucuda soğutma hava yerine su ile yapılırsa daha düşük yoğuşma sıcaklıkları ve buna bağlı olarak daha yüksek etkinlik katsayıları elde edilebilir. Fakat büyük endüstriyel tesisler dışında suyla soğutma ekonomik değildir.

Soğutucu akışkanın yoğuşturucudaki sıcaklığı çevre ortam sıcaklığının altına düşmez. Soğutucu akışkanın bu sıcaklığa karşı gelen doyma basıncı, kritik basıncın çok altında olmalıdır. Böylece ısı verme işleminin yaklaşık olarak izotermal olması sağlanabilir.

Soğutucu akışkanın zehirleyici olmaması, pas yapmaması, yanıcı olmaması kimyasal bileşiminin sabit olması ve doğal olarak ucuz ve kolay bulunabilir olması, göz önüne alınması gereken diğer etkenlerdir. Bir ısı pompasında kullanılan soğutucu akışkandan beklenen özellikler aşağıda maddeler halinde belirtildiği gibidir.

2.6.1 Soğutucu akışkan özellikleri

1. Akışkanlarda yüksek gizli ısı istenir. Buna bağlı olarak kompresör ve evaporatör küçülecek, dolayısıyla otomatik kontrol teçhizatları ucuzlayacaktır. Bu özellik aynı zamanda sistemin etkinliğine de arttırır
2. Uygun buharlaşma basıncı ve hacmi istenir. Yüksek basınçta buhar hacmi düşük, düşük basınçta ise büyüktür. Her ikisinin de uygun değerlerde olması istenir. Akışkanın normal atmosfer basıncında kaynama sıcaklığı çok yüksek ise normal soğutma sıcaklıklarında buharlaştırmak için çok düşük basınç gerektirir. Bu olay vakum oluşturur ve eğer kırık veya çatlak olursa sisteme hava girer ve içindeki su buharı donarak borularda tıkanma olmasına sebep olur.
3. Düşük yoğuşma basıncı istenir. Kompresörde sıkışıp basıncı artan buharı soğutarak sıvı hale dönüştürmek için uygun soğutma ortamı gerekir. Pratik olarak su ve hava kullanılır. Basınç ne kadar düşük olursa tesisat o kadar ucuz olur, basıncın artmasıyla malzeme et kalınlığı da artar.
4. Yüksek kritik basınç ve sıcaklığı istenir. Buharı sıkıştırmak için gerekli basınç ne kadar düşük ise kompresör gücü de o kadar düşük olur.
5. Düşük donma sıcaklığı istenir. Akışkan donma sıcaklığı düşük olması olağan dışı durumlarda dizayn yapılması gerektiğinde geniş basınç aralıklarında ısı pompasının çalışması sağlanabilir.
6. Yağlama yağı üzerinde fazla etkili olmamalıdır. Kimyasal etki yapmamalıdır. Yağın incilmesi sistemdeki parçalar için zararlıdır. Akışkan yağda erirse yağ incelir. Bazen de yağın tümü eriyerek akışkanla sürüklenir ve kompresör tamamen yağsız kalır. Genel olarak bir miktar yağ akışkanla sistem içine yayılır, bu yağın tekrar kompresör emme tarafına gitmesi gerekir. Elimizde kullanabileceğimiz uygun akışkan yoksa, yağla eriyen akışkanı kullanmak zorunda isek yüksek akışkan hızı seçmek gerekir.

7. Yüksek ısı geçirgenliğine sahip olması istenir. Böylece sistemin; mahal ve çevrede oluşan değişik sıcaklık koşullarına karşı tepkisi daha seri olacaktır. Ayrıca soğutucu akışkanın bu özelliğe sahip olması ısı transfer yüzeylerinin küçülmesi sağlar.
8. Küçük vizkozite istenir. Akışkanın hem sıvı hem de su buharı halindeki vizkozitesi düşük olmalıdır. Vizkozitesi büyük olan akışkanların basınçlandırılması için gerekli olan enerji miktarı daha azdır.
9. Elektrik iletkenliğinin olmaması istenir. Ayrıca yanıcı, zehirli ve tahriş edici olmamalıdır. Tamir sırasında borularda mutlaka bir miktar akışkan bulunur.
10. Ucuz ve saf olmalıdır. Su ile karıştığında asit etkisi yapmamalıdır Ozon tabakasına zararlı olmamalıdır. Sera etkisine sebep olmamalıdır.

2.6.2 Kullanılan akışkanlar

Geleneksel olarak ısı pompalarında çoğunlukla kullanılan akışkanlar ve akışkanlar ile ilgili özellikler aşağıdaki belirtilmiştir.

▪ CFC - 12	Düşük ve Orta sıcaklık	(maksimum 80°C)
▪ CFC - 114	Yüksek sıcaklık	(maksimum 120°C)
▪ R - 500	Orta sıcaklık	(maksimum 80°C)
▪ R - 502	Düşük - orta sıcaklık	(maksimum 55°C)
▪ HCFC - 22	Düşük sıcaklık ısı pompaları	(maksimum 55°C)

CFC (kloro-floro-karbon): Kimyasal stabilitesine ve içerdiği klorin miktarına bağlı olarak CFC' ler (kloroflorakarbon) global çevreye zararlıdır. CFC' ler hem ozon'u tüketme kapasitesine (ODP) " Ozone Depletion Potential" hem de global ısınma potansiyeline (GWP) " Global Warming Potential" sahiptirler. CFC alternatiflerinin global ısınmaya katkılarını belirlemek için, akışkanların çevreye olan etkileri TEWI "Total Equivalent Warming Impact" toplam ısıtma etkisi ile ifade edilebilir. TEWI, normal çalışma süresi boyunca, sistemi

çalıştırmak için gereken sera gazlarının direkt katkısı ile, sistemi çalıştırmak için gereken enerji sebebiyle ortaya çıkan CO₂ emisyonun indirekt katkısı toplamıdır. CFC' ler yasaklı akışkanlar grubuna dahildir. Yüksek ozon tüketme potansiyellerine bağlı olarak, varolan sistemlerde kullanılmasına izin verilmekle beraber, üretimi ve yeni sistemlerde kullanımı yasaklanmıştır. Yalnızca eskiyen sistemlerdeki gazların temizlenmesiyle elde edilebilmektedirler. Bu yüzden bu akışkanların oldukça pahalanaacağı ve bir noktadan sonra bulunamayacağı tahmin edilmektedir. Bu grubun kapsadığı akışkanlar R-11, R-12, R-13, R-113, R-114, R-115, R-500, R-502, R-13B1'dir.

HCFC (hidro-kloro-floro-karbon): Hidroflorakarbon'lar da klorin içermesine rağmen kloroflorokarbonlara göre ozon tüketme potansiyeli çok daha azdır. HCFC' nin ozon tüketme potansiyeli, düşük atmosferik kimyasal stabiliteye bağlı olarak CFC - 12'ye göre %12 daha azdır. Ayrıca Global ısıtma potansiyeli CFC - 12'nin %20'si kadardır. HCFC' lar geçiş akışkanları olarak da adlandırılırlar. HCFC' lar R-22, R-401, R-402, R-403, R-408 ve R-409 akışkanlarını içerir. Montreal protokolünde varılan anlaşmaya göre, HCFC'lar 2020 yılında endüstriyel ülkelerde ve 2040 yılında tamamen kullanım dışı bırakılacaktır. Avrupa Birliği ise bu maddenin kullanım dışı kalmasını hızlandırarak Haziran 2015 yılını hedeflemiştir. Avrupa'daki bazı (İsviçre, Almanya, Danimarka, İsveç, Avusturya) ülkeler daha da hızlandırarak R - 22'i 1998 ve 2002 tarihleri arasında kullanım dışı bırakmayı planlamışlardır.

HFC (hidro-flora-karbon): Hidroflorakarbonlar uzun dönemde alternatif akışkanlar olarak değerlendirilebilirler. Bu onların R-134a, R-152a, R-32, R-125, ve R-507 gibi klorin içermedikleri anlamına gelir. Ozon tüketimine etkileri olmadığı için, R-12, R-22 ve R-502'ye alternatif olabilirler. Fakat onların da global ısınmaya etkileri vardır. Yağlayıcı maddelerin kullanımında çok dikkat edilmelidir. Normal olarak akışkan üreticileri tarafından önerilen; ester tabanlı yağlayıcı maddelerin kullanılmasıdır.

HFC-134a termodinamik özellikler olarak CFC-12'ye çok benzemektedir. HFC-134a kullanılan bir ısı pompasının Performans katsayısı (COP) pratik olarak CFC-12 kullanılan ısı pompasınınkiyle aynı olacaktır. Düşük evaporatör sıcaklığında (-1°C'ın altında) ve büyük sıcaklık artışlarında performans katsayısı biraz daha düşük olacaktır.

HFC-152a esas olarak R-500'ün bir parçası olarak kullanılmıştır fakat o da birçok küçük ısı pompası ve buzdolabı uygulamalarında kullanılmıştır. HFC-152a günümüzde karışımlarda eleman olarak kullanılmaktadır. Yanıcıdır.

HFC-32 orta yanıcı olarak kabul edilebilir ve sıfıra yakın global ısıtma potansiyeli vardır. Uzun dönemde iklimlendirme, ısı pompası ve endüstriyel soğutma uygulamalarında HCFC-22'nin yerine uygun bir akışkan olarak düşünülmektedir. HFC-32, yanıcı olmayan karışımlarda R-502 ve HCFC-22 yerine ana bileşen olarak kullanılmaktadır.

HFC-125 ve HFC-143a hemen hemen R-502 ve HCFC-22 ile benzer özelliklere sahiptir. Üç parçalı karışımlarda R-502 ve HCFC-22 yerine ana bileşen olarak uygulanır. Fakat, global ısıtma potansiyeli HFC-134a'ya göre üç kat daha fazladır.

2.6.3 Karışımlar

Bir karışım iki veya daha fazla akışkanı içerebilir ve zeotropik,azeotropik veya azeotropike yakın olabilir. Azeotropik karışımlar sabit sıcaklıkta buharlaşır ve yoğuşurlar.

İlk karışımlar CFC-12 ve R-502'nin yerini alması için HCFC-22 veya HCFC akışkanları (HCFC-124 ve HCFC-142b) içeriyorlardı ve bu yüzden geçiş akışkanları olarak kabul ediliyorlardı.

R-502'nin ve HCFC-22'nin yerini alması için oluşturulan yeni nesil karışımlar ise klorin içermiyorlar ve temel olarak HFC' lardan (HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC143a) ve hidrokarbonlardan oluşuyorlar. Günümüzde R-22'nin yerini alması için ısı pompası uygulamalarında kullanılan ve gelecek için umut veren iki akışkan karışımı R-410A ve R407C'dir. İkisi arasındaki temel fark kimyasal kompozisyonlarıdır. R-410A R-32 ve R-125'in karışımıdır, R-407C ise R-32, R-125 ve R-134A'dan oluşmaktadır.

R-407C termal özelliklerinin ve çalışma şartlarının benzer olması nedeniyle kullanımdaki R-22'li sistemlerin yerine acilen kullanılabilecek yek akışkandır. Bu akışkanın kullanımı artmakla beraber servisler ve üreticiler için hala bazı mühendislik problemleri içermektedir.

Araştırmalar göstermiştir ki; R-410A kullanarak R -22'ye kıyasla çok daha iyi COP değerleri elde edilmektedir. R-410A kullanarak toplam maliyette azalma sağlanabilir çünkü sistem bileşenlerinin özellikle kompresörün ölçülerinde, akışkanın volumetrik kapasitesinin yüksek olması nedeniyle önemli miktarda azalma olacaktır. Dezavantajı ise; R-22'ye kıyasla daha yüksek olan çalışma basıncıdır. R-410 Amerika'da ve Japonya'da paket tipi ısı pompalarında ve klima santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.6.4 Doğal akışkanlar

Doğal akışkanlar, biosfer de doğal olarak mevcut olan maddelerdir. Global çevreye zararları sıfır veya sıfıra yakındır. Doğal akışkanların örnekleri amonyak (NH_3), hidrokarbonlar, karbondioksit (CO_2), hava ve sudur. Bazı doğal akışkanlar zehirli ve yanıcı olduğundan sistemler tasarlanırken güvenlik önlemleri alınmalıdır.

Amonyak (NH_3) : Amonyak çoğu ülkede orta ve büyük soğutma ünitelerinde başlıca kullanılan soğutucu akışkandır. Toksik ve yanıcı karakteri nedeniyle kullanımı için ayarlar ve kurallar geliştirilmiştir. Termodinamik ve ekonomik olarak yeni ısı pompaları ekipmanlarında CFC'lara ve HCFC-22'ye en iyi alternatiftir. Bugün için sadece büyük ısı pompası sistemlerinde kullanılmıştır ve yüksek basınç kompresörleri kondensasyon sıcaklığını 58°C 'dan 78°C 'a çıkarmıştır. Bakırın amonyakla kullanımı uygun olmadığı için bütün bileşenler çelikten yapılmak zorundadır. Günümüzde elverişli yüksek basınç kompresörleri olmadığı için (maksimum.40bar) yüksek sıcaklık endüstriyel ısı pompalarında amonyak henüz kullanılamamaktadır. Eğer verimli yüksek basınç kompresörleri geliştirilirse, amonyak mükemmel bir yüksek sıcaklık soğutucu akışkanı olacaktır.

Hidrokarbonlar (HC) : Günümüzde, propan, propilen, ve propan karışımları, bütan, ve etan ısı pompası sistemlerinde kullanılabilecek en umut verici soğutucu akışkan olarak değerlendirilmektedirler.

Su : ne toksik nede yanıcı olması ayrıca uygun termodinamik özellikleri suyu yüksek sıcaklık endüstri ısı pompalarında kullanılabilecek mükemmel bir akışkan yapar. Tipik olarak çalışma

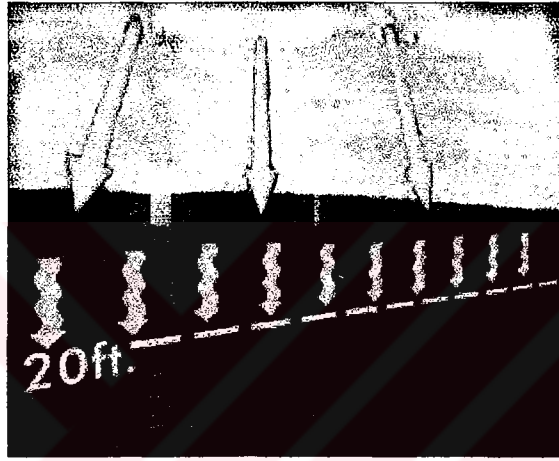
sıcaklıkları 80°C ila 150°C arasında değişir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında suyun kullanılması fikrine her geçen gün artan bir ilgi vardır. Japonya da yapılan bir test uygulamasında 300°C elde edilmiştir. Su ile çalışmanın en büyük dezavantajı ise sahip olduğu düşük volumetrik ısı kapasitesidir (kJ /m^3). Bu özellik özellikle düşük sıcaklıklarda büyük ve pahalı kompresörler gerektirir.

Karbondioksit (CO_2): CO_2 ne toksik nede yanıcıdır ayrıca normal yağlama yağlarıyla ve genel konstrüksiyon malzemeleri ile uyumludur. Volumetrik soğutma kapasitesi yüksektir. Fakat, CO_2 kullanan ısı pompası çevrimlerinin teorik COP değeri oldukça düşüktür ve bu akışkanın verimli şekilde kullanılması kritik nokta yakınlarında veya üstündeki çalışma noktalarında düşük güç tüketimi ile çalışma metotlarının geliştirilmesi ile mümkündür.



3. YER KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR

Güneş enerjisi; bizim en büyük enerji kaynağımızdır. Kullandığımız tüm enerji kaynakları güneş enerjisinden türemektedir. Fakat, güneş enerjisinin karasız yapısı nedeniyle doğrudan tutulması pahalı ve güçtür. Büyük bir kütleyle sahip olan jeokütle, yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin hemen hemen yarısını yutarak bünyesinde barındırır. Dolayısıyla yeryüzü , güneş enerjisini depolayarak; soğutma sezonunda dış havadan daha düşük sıcaklıklara, ısıtma sezonunda ise dış havadan daha yüksek sıcaklıklara sahip bir ısı enerji kaynağı olarak karşımıza çıkar.



Şekil 3.1 Güneş enerjisinin jeokütle tarafından depolanması.

Güneş ışınlarının yeryüzüne çarpmasıyla jeokütlerde depolanan ısı enerjisini yeryüzünden yaşam alanlarına aktarmak amacıyla; yer kaynaklı ısı pompaları tasarlanmıştır. Depolanan bu enerjiden amaçlanan doğrultuda faydalanmak için üç ayrı yöntem esas alınabilir.

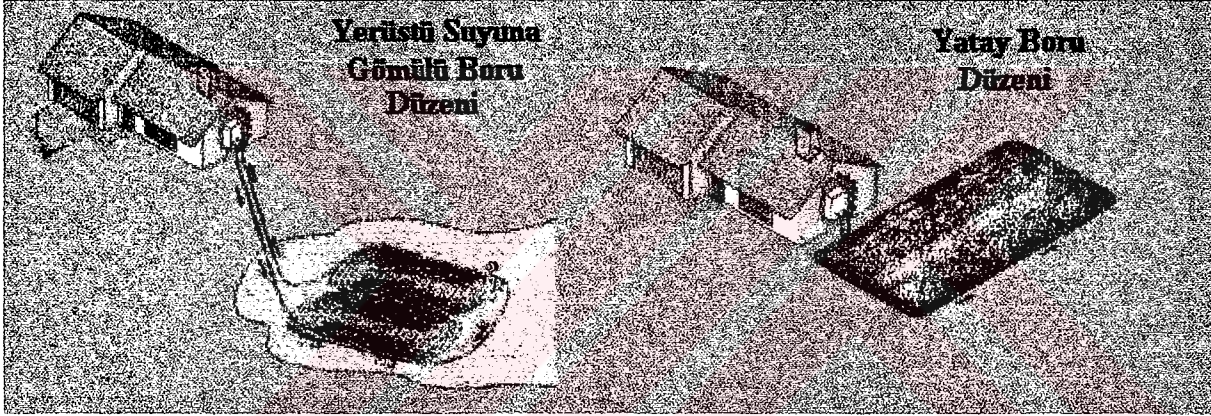
Bunlardan birincisi; jeokütleden doğrudan faydalanarak jeokütlenin taşıdığı enerjinin yaşam alanlarına aktarılmasıdır. Bu yüzey suları gibi ısı kaynağının taşınılabildiği durumlarda benimsenebilecek bir yöntemdir. Isı kaynağı olan yüzey suları; bir pompa vasıtasıyla alınıp, ısı pompası sisteminde buharlaştırıcı da soğutucu akışkana enerjini vermesi esasına dayanır.

Toprak gibi ısı kaynağının yaşam alanlarına doğrudan aktarılamadığı durumlarda jeokütleden dolaylı olarak faydalanarak; jeokütlenin taşıdığı enerjinin yaşam alanlarına aktarılması; jeokütle içerisine gömülmüş veya daldırılmış boru düzenlerinin içinden ısı taşıyıcı akışkanın geçirilmesi ile sağlanır. Bu boru düzenleri içindeki ısı taşıyıcı akışkanlar jeokütle ile ısı alışverişinde bulunarak, jeokütlenin enerjisini ısı pompası sisteminde yer alan buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktarırlar.

Bazen ısı kaynağının yaşam alanlarına doğrudan aktarılamadığı durumlarda; jeokütlenin taşıdığı enerjinin yaşam alanlarına aktarılması; jeokütle içerisine gömülmüş veya daldırılmış boru düzenlerinin içinden, ısı taşıyıcı akışkanın geçirilmesi yerine doğrudan soğutucu akışkanın geçirilmesiyle jeokütlenin enerjisinden faydalanmak gerekebilir. Burada, soğutucu akışkan ihtiyacının artması sonucu sisteme ilave olarak gelen maliyetlerin kabul edilebilir düzeylerde olmasına dikkat edilmelidir.

3.1 Yer Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Çalışma Şekli ve Elemanları

Yer kaynaklı ısı pompaları konutlarda ısıtma, soğutma ve nem kontrolü sağlarlar. Bunun yanı sıra, ya ilave ısıtma sağlayarak ya da alışılagelmiş sıcak su üreticilerinin yerine geçerek, sıcak su üretiminde de yer kaynaklı ısı pompalarından faydalanılabilir.



Şekil 3.2 Bazı yer kaynaklı ısı pompası uygulamaları.

Yer kaynaklı ısı pompası sistemlerinde şekil 3.2’ de görüldüğü gibi üç ana kısım veya alt sistem bulunmaktadır. Bunlar;

1-) Isı taşıyıcı akışkan ile jeokütlenin temasını sağlayarak, ısı alışverişine imkan sağlayan boru düzenleri yani, ısı değiştiricileri.

2-) Jeokütleden elde edilen ısıyı binaya aktaran sistem, yani ısı pompası

3-) Bina içindeki mahalleri ısıtmak veya soğutmak için gerekli olan ısıdan yararlanma tesisi yani, ısı dağıtım tesisi.

Ayrıca, bu sistemlerde binanın sıcak su ihtiyacını desteklemek amacıyla kızgın buhar soğutucusu veya sıcak su ihtiyacını tümünü karşılamak için sıcak su üreticisi bulunur.

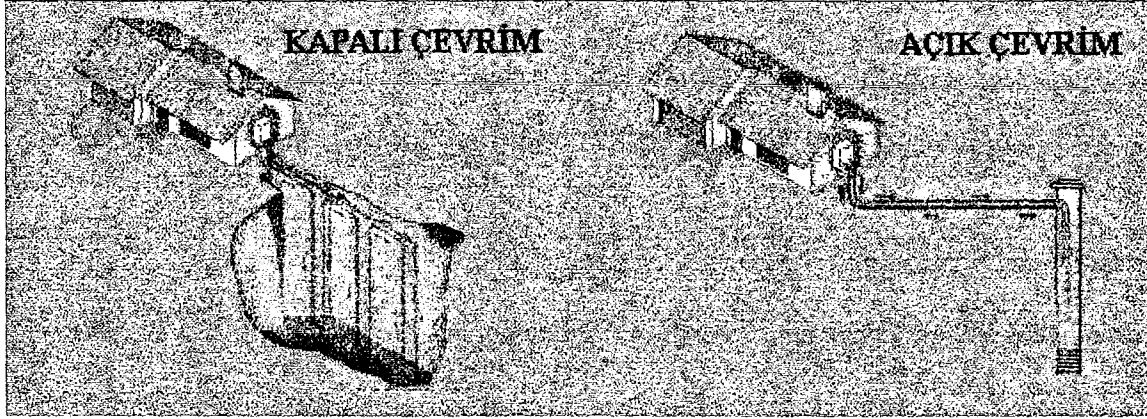
Isıtma sezonunda ısı, yer kaynaklı ısı pompası vasıtasıyla, toprak veya su ısı değiştiricisine bağlanan devrede dolaşan ısı taşıyıcı akışkandan çekilir ve zorlanmış havalı sistemlerle (hava kanalı sistemi) veya sulu sistemler (döşmeden ısıtma sistemi veya radyatörle ısıtma sistemi) vasıtasıyla eve ya da binaya dağıtılır.

Soğutma sezonunda ise ısı, soğutulacak ortamlardan çekilerek yer kaynaklı ısı pompası vasıtasıyla, toprak veya su ısı değiştiricisine bağlanan devrede dolaşan ısı taşıyıcı akışkandan jeokütleyle atılır.

3.1.1 Yer ısı değiştiricisi

Yer ısı değiştiricileri, gömölerek veya daldırılarak jeokütle ile teması sağlayan boru düzenleridir. Isıtma sezonunda, jeokütlenin enerjisini içerisinde dolaştırdıkları ısı taşıyıcı akışkan yardımıyla ısı pompası sisteminin evaporatörüne aktararak soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlarken, soğutma sezonunda ısı pompası sisteminin yaşam alanlarından çektiği ısıyı jeokütleyle atarak ısı pompası çevrimini tamamlarlar.

Yer ısı değiştiricileri içerilerinde dolaştırdıkları ısı taşıyıcı akışkanın akış şekline göre sınıflandırmak mümkündür. şekil 3.3’ de görüldüğü gibi, yer ısı değiştiricileri ısı taşıyıcı akışkanın akış şekline göre; “Kapalı Çevrim” ve “Açık Çevrim” olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kapalı çevrim esasına göre çalışan yer ısı değiştiricilerinde ısı taşıyıcı akışkanın yenilenmesine gerek yoktur. Dolayısıyla bu sistemlerde kullanılan ısı taşıyıcı akışkan miktarı değişmez. Aynı akışkan ısı pompası çevriminde kullanıldıktan sonra, tekrar ısıtılmak veya tekrar soğutulmak üzere yer ısı değiştiricilerinde dolaştırılır. Yerüstü su kaynaklı ısı pompalarında, kapalı çevrimli yer ısı değiştiricileri kullanılabildiği gibi açık çevrim esasına göre çalışan yer ısı değiştiricileri kullanmak mümkündür ve bu sistemlerde ısı taşıyıcı akışkan ısı kaynağının bünyesinden sağlanır. Açık çevrim esasına çalışan göre yer ısı değiştiricilerinde ise ısı pompası çevriminde kullanılan akışkan ısı kaynağına atılarak çevrime gene ısı kaynağından sağlanan fakat kaynak özelliklerini bünyesinde barındıran yeni akışkanla devam edilir. Bazen ısı pompası çevriminde kullanılan akışkan; özellikle ısı kaynağının kapasitesinin sınırlı olduğu durumlarda, ısı kaynağının sıcaklığının düşmemesi için tekrar kullanılmamak üzere başka ortamlara atılır. Isı kaynağının bir defa kullanılması ısı pompasının kullanılması bu tür ısı pompalarının en büyük dezavantajı olarak karşımıza çıkar.



Şekil 3.3 Kapalı çevrim ve açık çevrim.

Yer kaynaklı ısı değiştiricilerinde toprağa gömülen veya suya daldırılan borular polietilen malzemeden yapılmaktadır ve genellikle boruların içerisinde su ile antifriz karışımı veya yer altı suyunun kendisi geçirilmektedir. Boru serpantinleri düşey veya yatay olabildiği gibi spiral, helisel ve benzeri değişik geometrilerde de olması mümkündür. Serpantin geometrilerini belirlerken boruların birbirleriyle olan ısı etkileşimini göz önünde bulundurmak gerekir.

Sadece direkt genleşmeli sistemler denilen bazı sistemlerde, su ile antifriz karışımı yerine ısı pompasının soğutucu akışkanı toprak veya su ısı değiştiricisinden geçer. Böylece, su eriyiği, ilave pompa ve ısı değiştiricisi ihtiyacı ortadan kalkar. Direkt genleşmeli sistemlerde, bakırdan yapılmış serpantinler kullanılır ve hiçbir ısı değiştiricisi olmadığı için sistem daha verimlidir. Şekil 3.4' te değişik yer ısı değiştiricileri gösterilmiştir.

3.1.1.1 Seri veya paralel akış

Yer ısı değiştiricileri, içerisindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış şekline göre; seri veya paralel olarak dizayn edilebilirler. Sistemin seri veya paralel olarak seçilmesi, sistem performansını, pompalama ihtiyacını ve maliyeti etkiler. Seri tipte tek bir akış yolu mevcuttur. Paralel tipte ise birkaç akış yolu mevcuttur. Her iki akış türünün de avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir. Özellikle büyük ticari yapılarda, sistemlerin; yer ısı değiştiricisindeki basınç kayıpları ve pompalama maliyetleri dikkatli bir şekilde tasarlanmalıdır. Aksi takdirde bu kayıp ve giderler çok yüksek değerler olarak sistemin işletilmesini güçleştirir.

Seri sistemin avantajları; tek bir akış yolunun bulunmasından dolayı tek tip ve boyutta boru kullanılabilmesi, sistemden hava almanın paralel sistemden daha kolay olması, boru çapının

daha büyük olması sebebiyle birim boydaki borunun termal performansının daha iyi olması olarak sayılabilir.

Seri sistemin dezavantajları ise; boru çaplarının daha büyük olması sebebiyle sitem içerisinde daha fazla ısı taşıyıcı akışkan dolaştırılması ve dolayısıyla daha fazla antifriz gerektirmesi, boru ve işçilik maliyetinin daha fazla olması, akışkanın basınç kaybının boru çapına bağlı olarak artması sebebiyle; pompalama giderlerinin yükselmesi ve bundan dolayı yer ısı değiştiricisinin boyunun sınırlı olması sayılabilir.

Paralel sistemin avantajları; kullanılan boru çaplarının daha düşük olmasından dolayı boru maliyetinin seri sisteme göre daha az olması, dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkan hacmi daha az olduğundan gerekli olan antifriz miktarının da daha az olması, basınç kayıplarının da daha az olması, buna bağlı olarak pompalama giderlerinin ve dolayısıyla işletme maliyetinin daha düşük olması sayılabilir.

Paralel sistemin dezavantajları ise; sistemin havasının alınmasının daha zor olması ve dengeli bir akış ve sistem boyu elde etmek için boru güzergahındaki akış balansının sağlanması gerekmektedir.

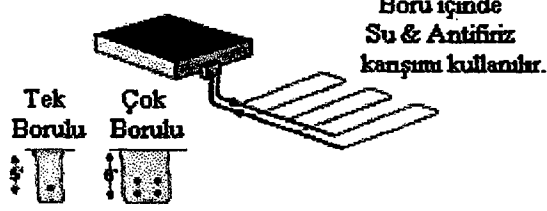
3.1.1.2 Yer ısı değiştiricisi tipleri

Yer kaynaklı ısı pompaları sistemlerinde, kullanılan yer ısı değiştirici tipleri üç ana grup altında toplanır.

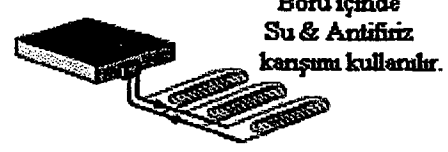
1. Kapalı çevrimli yer ısı değiştiricileri
2. Kapalı çevrimli yer ısı değiştiricileri
3. Direkt enjeksiyonlu yer ısı değiştiricileri

Kullanılan yer ısı değiştiricileri; ısı pompası sistemlerinin performansını, pompalama enerji ihtiyacını ve ilk yatırım maliyetini etkiler. En verimli yer ısı değiştiricisi tipinin seçimi; yerel coğrafya özelliklerinin, arsa alanının ve sistemin ekonomikliğin bir fonksiyonudur. Şekil 3.4’de değişik yer ısı değiştiricileri gösterilmiştir.

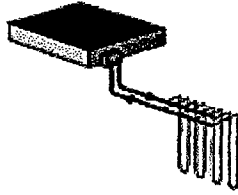
1) Yatay Kapalı Çevrim



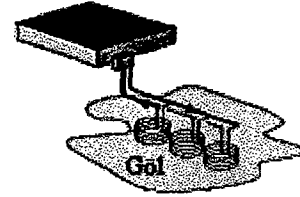
2) Spiral Kapalı Çevrim



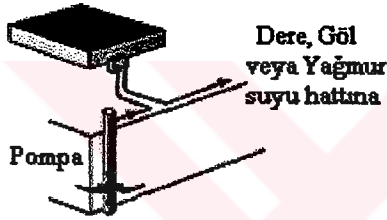
3) Düşey Kapalı Çevrim



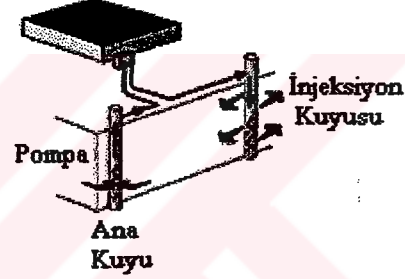
4) Yer Üstü Su Kaynaklı Kapalı Çevrim



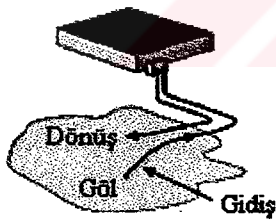
5) Tek Kuyulu Açık Çevrim



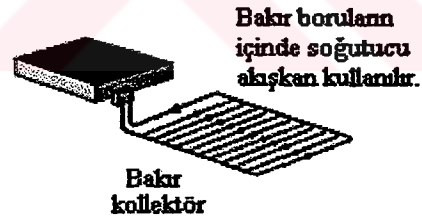
6) Çift Kuyulu Açık Çevrim



7) Yer Üstü Su Kaynaklı Açık Çevrim



8) Direkt Genleşmeli Sistem



Şekil 3.4: Değişik tip yer ısı değiştiriciler.

3.1.1.2.1 Kapalı çevrimli sistemler

Kapalı çevrimli sistemler, yer altına gömülü bir boru şebekesinden oluşurlar ve şebekeyi oluşturan yüksek güçlü plastik borular ısı değiştiricisi vazifesini görürler. Boru şebekesi, ısı taşıyıcı akışkanla doludur ve genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak su veya su-antifriz karışımı kullanılır. Kapalı çevrimli sistemler, yer ısı değiştiricisi içerisindeki ısı taşıyıcı akışkanın sirküle edilmesi işlevini sağlayan bir sirkülasyon pompası gerektirirler.

Tüm sistem göz önüne alındığında, yer kaynaklı ısı pompası sistemleri; soğutucu akışkan ile yaşam alanı arasında, ısı taşıyıcı akışkan ile soğutucu akışkan arasında ve yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkan ile jeokütle arasında olmak üzere üç adet çevrim gerçekleştirirler. Soğutucu akışkan çevrimi ile ısı taşıyıcı akışkan çevrimi arasındaki enerji alışverişi bir ısı değiştirici vasıtasıyla sağlanır. Bu ısı değiştiricisi, ısı pompası sistemi ile yer ısı değiştiricisi sisteminin ortak bir elemanıdır ve soğutma sezonunda soğutucu akışkanın yoğuşmasını sağlarken, ısıtma sezonunda ise soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlar. Yazın soğutma ihtiyaçları nedeniyle yer ısı değiştiricisindeki akışkanın sıcaklığı artar ve soğutucu akışkandan aldığı bu ısıyı, daha serin olan toprağa ısı transfer ederek çevrimini tamamlar. Buna karşılık kışın ısıtma ihtiyaçları nedeniyle sıcaklığı düşen ısı taşıyıcı akışkan, kaybettiği enerjisini kendisinden daha sıcak olan topraktan alarak çevrimini tamamlar.

Kapalı çevrimli sistemlerde yer ısı değiştiricilerinin, yatay, spiral, düşey ve yüzey suyuna daldırılmış değişik kurulumları vardır.

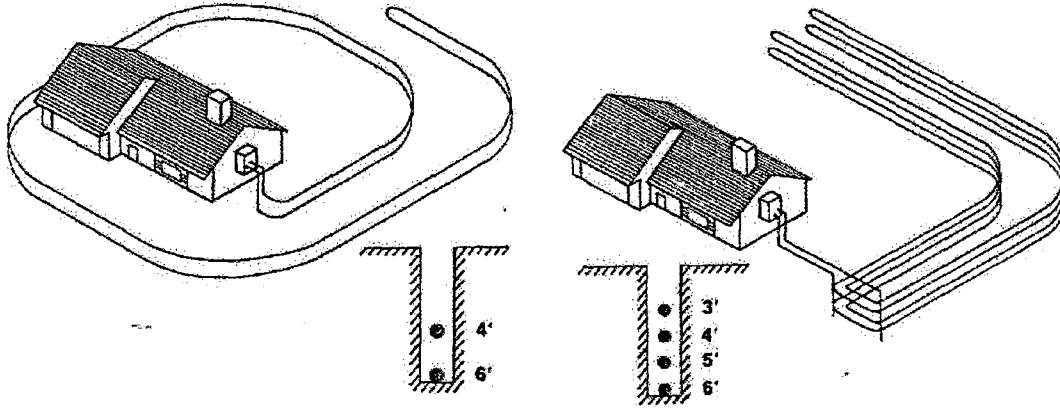
3.1.1.2.1 Yatay yer ısı değiştiricileri

Şekil 3.4'de 1. figürde gösterilen yatay ısı değiştiricileri, genellikle arsa alanının uygun olması durumunda kullanılırlar. Yatay sistemler tek bir hendek veya birbirine yakın hendekler içine bir veya birden fazla borunun yerleştirilmesiyle oluşur. Bu ısı değiştiricilerinin iyilik derecesi borular arasındaki mesafeye bağlıdır. Dizaynlarda herhangi bir yerde her hendek içine 1-6 borunun yerleştirilebilmesi mümkündür.

Hendek uzunluklarına, toprak koşullarına ve bir hendekteki boru sayısına bağlı olarak bu sistemlerde; birim soğutma yükü için boru boyları 8,7 – 34,6m/kW arasında değişir.

Yatay ısı değiştiricileri ısı taşıyıcı akışkanın akış yönüne göre seri veya paralel olarak sınıflandırılabilir, (Şekil 3.5). Bununla beraber toplam hendek uzunluğunu kısaltmak amacıyla tek bir hendek içerisine birkaç boru yerleştirilebilir. Hendeklerin genişliği 0,6-0,9m mertebelerindedir. Borular, yüzey şartlarından en az etkilenmeleri amacıyla, genellikle 1,2-3,0m derinlikte döşenirler. Bu mesafe arttıkça, ısı değiştiricisinin iyilik derecesi; gerek toprak sıcaklıklarının daha uygun olması, gerekse boruların yüzey şartlarından daha az etkilenmesi sebebiyle artar. Ancak bu durumda, hafriyat masrafları da artacağından; gömme derinliğine ekonomik analiz sonucu karar verilmelidir. Şayet, tek bir hendek içerisine birkaç kat boru döşenecek ise, borular arası kot farkı genellikle 0,3-0,5m civarında olmalıdır. Hendekler

genellikle 1,8-3,7m aralıklarla kazılır. (L, Miles 1994).Çoklu boru dizilişlerinde, boru boyları daha fazla olmasına rağmen, arsa alanının daha ekonomik kullanılması, daha az hendek gerektirmesi sebebiyle, bu sistemin kurulum maliyeti tek borulu dizilişten daha azdır.



Şekil 3.5 Paralel ve seri akışlı yatay yer ısı değiştiricileri.

Yatay toprak ısı değiştiricisinin tesis edilmesi için boruların serileceği bir bahçe alanına ihtiyaç duyulur. Nöring&Prei♣ firmasının jeotermal ısı pompalarını tanıttığı katalogunda, yatay toprak ısı değiştiricisinin tesis edileceği bahçe alanın, bina alanının 1,2-2 katı kadar alana sahip olması gerektiğini belirtir.

Bu sistemler, etkin ısı transferinin sağlanması için fazla arazi alanı gerektirdiklerinden; genellikle konutlarda uygulanır. Bununla birlikte nadiren, geniş ısı kapasiteli ticari uygulamalarda da yatay toprak yer değiştiricili yer kaynaklı ısı pompası sistemleri kullanılabilir. Yatay sistemler, yer altı su tabakasının ve geniş arazi alanlarının bulunduğu yerlerde popüler olarak kullanılırlar.

Yatay yer ısı değiştiricileri, bahçelerin veya park yerlerinin altına gömülebilir. Borular döşendikten sonra, dikkat edilecek bir başka husus da, toprak ve boru arasındaki ısı geçişini iyileştirmek amacıyla hendekten çıkarılan toprağın, yerine tekrar yerleştirilirken yoğunluğunu arttırmak için sıkıştırılması gereğidir.

Toprak ısı değiştiricilerinin seri yerleştirilmesi, basınç düşmesi ve ekonomik değerler incelenerek ele alınmalıdır. Çizelge 3.1'de boru çaplarına göre pratikte uygulanan uzunluk sınırları verilmiştir (Ataman,1985).

Çizelge 3.1 Pratikte kullanılan boru çaplarının, boru uzunluğuna bağlı değerleri.

Boru Çapı (inç)	Boru Uzunluğu (m)
$\frac{3}{4}$	≤ 150
1	≤ 230
$1\frac{1}{4}$	≤ 900
$1\frac{1}{2}$	≤ 1200
2	≤ 2500

Avantajları: Hendek açma maliyetlerinin kuyu açma maliyetlerinden daha ucuz olması, yatay sistemlerin daha esnek kurulum seçeneklerine sahip olması.

Dezavantajları: Geniş arazi alanları gerektirmesi, sistemin, toprak sıcaklıklarının sığı derinliklerde ki mevsimlik değişiminin etkisi altında kalması, toprağın ısı özelliklerinin mevsimlik değişimlere bağlı olarak düzensiz olması, yağış miktarının, gömme derinliğinin, ve toprağın kuruluşunun düzensiz olması sebebiyle boru boyu hesaplanmasının zor olması, antifriz karışımlarının; pompalama enerjisi ihtiyacını artırıp ve bununla birlikte transfer olan ısı miktarını azaltması sonucu yer ısı değiştiricisinin etkinliğini düşürerek, sistemin genel verimliliğini azaltması.

3.1.1.2.1.2 Spiral yer ısı değiştiricileri

Çok borulu yatay ısı değiştiricilerinin bir diğer çeşidi de spiral yer ısı değiştiricileridir. Şekil 3.4'de 2. figürde gösterildiği gibi spiral yer ısı değiştiricileri; yatay dizilişe sahip, hendeklerin içine yerleştirilmiş sarmal yapıda borulardan oluşmaktadır. Spiral yer ısı değiştiricilerin bir başka kurulum şeklide, dar düşey hendeklerin içerisine dik olarak sarmal boruların yerleştirilmesi ile elde edilir.

Spiral yer ısı değiştiriciler, kurulum aşamasında genellikle daha fazla boru gerektirirler. Tipik olarak birim soğutma yükünün sağlandığı boru boyları; 43,3 - 86,6 m/kW arasında değişir. Fakat bu sistemlerin hafriyat masrafları, yukarıda açıklanan yatay yer ısı değiştiricilerde gereken hafriyat masraflarından daha azdır.

Yatay düzendeki spiral yer ısı değiştiriciler için genellikle 0,9-1,8m genişlikte hendek gerektirirler.Çoklu düzende ise hendekler arası mesafe 3,7m olmalıdır. Düşey düzendeki spiral yer ısı değiştiricilerinde, hendekler 15,2cm genişliğindedir ve borular, düşey olarak dar hendeklerin içinde bulunmaktadır.

Hafriyat maliyeti, sistemin ilk yatırım maliyetinin önemli bir kısmını oluşturduğunda, spiral yer ısı değiştiriciler kullanarak sistemin ilk yatırım maliyetini düşürmek mümkündür. Yatay düzendeki spiral yer ısı değiştiriciler; genellikle düşük kapasiteli sistemlerle beraber ve arsa alanının serbest olduğu durumlarda kullanılırlar.

Avantajları: Diğer yatay sistemlerden daha az hafriyat gerektirmesi, bazen ilk yatırım maliyetlerinin diğer yatay sistemlerden daha az olması.

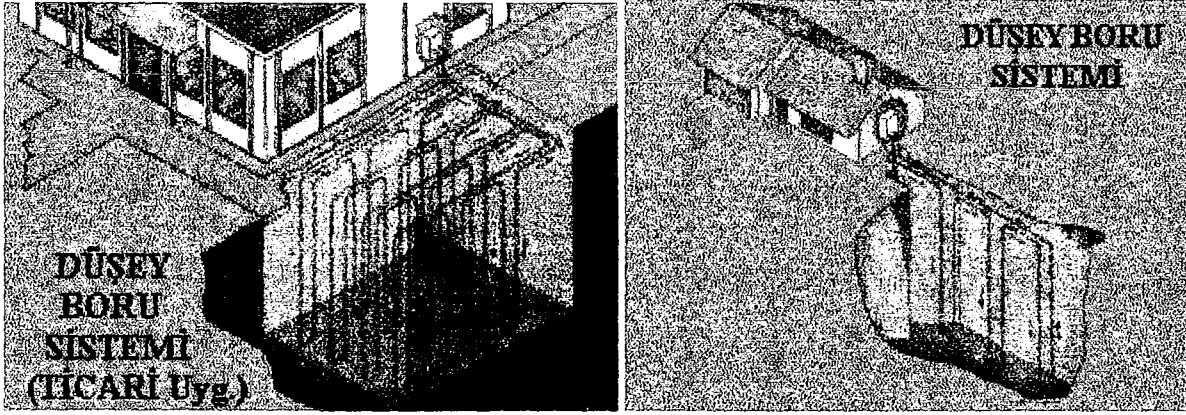
Dezavantajları: Diğer ısı değiştirici dizaynlarından daha fazla boru gerektirmesi, diğer ısı değiştirici dizaynlara nazaran daha fazla arsa alanı gerektirmesi,toprak sıcaklığının mevsimlik değişimlerin etkisinde kalması, diğer yatay sistemlere göre daha fazla pompalama enerjisi gerektirmesi, kazım sonrası toprağın geri doldurulması işlemi boyunca boru sistemi zarar görebilir.

3.1.1.2.1.3 Düşey yer ısı değiştiricileri

Şekil 2.4'de 3. figürde gösterilen düşey yer ısı değiştiricileri, genellikle arsa alanı sınırlı olduğunda kullanılırlar. Kuyuların derinlikleri genellikle 22,9-91,4m arasındadır. Kapalı çevrimli yer ısı değiştiricisindeki borular, düşey kuyunun içerisinden geçirilirler. Toprak ve sıcaklık şartlarına göre birim soğutma yükünü sağlayan tipik boru boyu 17,4-52,2m/kW arasında değişir.

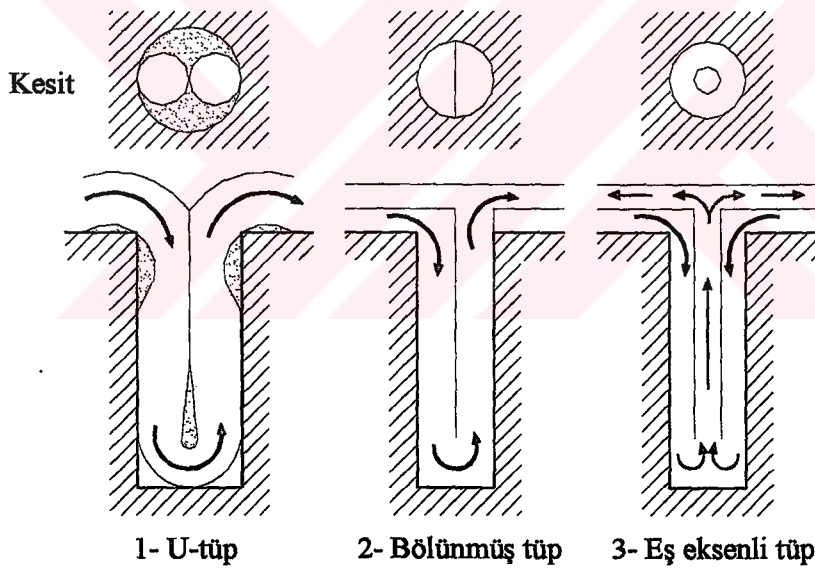
Yer ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin tasarımında; ısı değiştiricisinin döşenmesi gereken alanın azaltılmasının bir amaç olduğu düşünülürse, düşey yer ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin, diğer sistemlerden en büyük avantajı ortaya çıkar.

Genellikle çoklu kuyu sistemlerine ihtiyaç duyulur ve kuyular birbirlerinden 3,0-4,9m aralıklarla yerleştirilirler. Toplam ısı ihtiyacını karşılamak için borular seri veya paralel olarak yerleştirilirler. Düşey yer ısıtıcılı ısı pompası sistemlerinin, seri ve paralel akışlı yerleşimleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Seri ve paralel akışlı düşey yer ısı değiştiricileri.

Arsa alanlarının sınırlı olduğu, su tabakasının yüzeyden çok derinde olduğu durumlarda ve zeminin kayalık olduğu durumlarda bu sistemler yaygın olarak kullanılır. Düşey yer ısı değiştiricileri kesit geometrilerine göre üç basit tipi bulunmaktadır. (Ataman,1985) U tüp, Bölünmüş tüp ve Eş eksenli tüp. (Şekil 3.7)

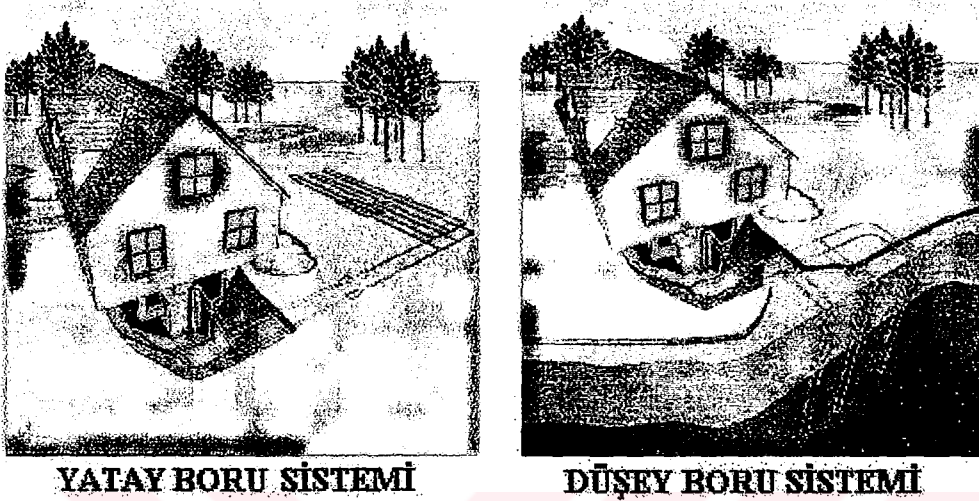


Şekil 3.7 Kesit geometrilerine göre düşey yer ısı değiştiricileri.

Avantajları: Kapalı çevrimli sistemler içerisinde, bu sistemlerin en az boruya ihtiyaç duyması, pompalama enerji ihtiyacının diğer kapalı çevrimli sistemlerden daha az olması, tüm sistemler içerisinde en az yüzey alanına ihtiyaç duyan sistem olması, toprak sıcaklığının mevsimlik değişimlerinden etkilenmemesi.

Dezavantajları: Delme makineleri ve ekipmanlarını gerektirmesi, delme işleminin hendek açma işleminden daha pahalı olması.

Tezimizde ısı kaynağı olarak toprak kullanılmaktadır. Toprak ısı değiştiricileri şekil 3.8’de görüldüğü gibi yatay veya dikey olarak yerleştirilebilir. Dikey ısı değiştiricileri yerlerine, delme makineleriyle yapılan kazım sonucu yerleştirilirken, yatay sistemi kurmak için ise bir veya birkaç hendek açılmalıdır.



şekil 3.8 Yatay ve düşey toprak ısı değiştiricileri .

Dikey ısı değiştiricilerinin yatay ısı değiştiricilerine göre bazı avantajları vardır. Dikey ısı değiştiricilerinde genellikle boruların büyük bir bölümü toprak altındaki sulu bölgede yani toprağın düşük ısı direnç gösteren bölümündedir ve yer altı sularının hareketleri ısı değiştiricisinin iyilik derecesini yükseltmektedir. Ancak dönüş ve besleme borularını aynı deliğe yerleştirme zorunluluğu da, ısı geçişi bakımından kısa devreye sebebiyet vereceğinden, dikey tiplerin yerleştirilmesinde bu noktaya dikkat edilmelidir. Borular arasındaki ısı geçişi, ısı değiştiricisi iyilik derecesinin düşmesine sebep olur ve bu etki delik boyuyla birlikte artar.

Diğer yandan yatay ısı değiştiricisinin iyilik derecesi ısıtma ve soğutma mevsimleri boyunca yağmur, kar ve diğer yüzey olayları sebebiyle, ısı değiştiricisinin yzeeye yakınlığı ile orantılı olarak etkilenir.

3.1.1.2.1.4 Yer st suyuna daldırılmış ısı değiştiricileri

Eğer ortalama boyutlarda gl veya gölet mevcutsa şekil 3.4’de 4. figürde gösterildiği gibi yer ısı değiştiricisi su kaynaklarına daldırılarak tesis edilebilir. Bu tip sistemlerde, hava şartlarına bağlı olarak ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için uygun alan ve derinliğe ihtiyaç duyulur.

Genellikle birim soğutma yükü başına ihtiyacı duyulan boru boyu yaklaşık 26,0m/kW olmalıdır ve bu sistemler gene birim soğutma yükü başına yaklaşık 79,2m²/kW su birikintisi alanı gerekir.

Genellikle bu sistemlerde borular, beton desteklere tutturularak yer üstü suyuna daldırılır. Bu beton destekler, boruların akıntılara karşı hareketlerini kısıtlayarak korurlar. Ayrıca boruları su birikintisinin yüzeyinden 22,9-45,7cm yüksekte tutarak ısı transferi yüzeyi etrafındaki suyun akışının normal olmasını sağlarlar. Isı değiştirici borularının su birikintisi yüzeyinden 1.8-2,4m aşağıda olması önerilir, hatta boruları daha derinlere yerleştirme imkanı varsa bu imkan değerlendirilmelidir. Bu derinlikler boruları, termal kütlenin; aşırı kuraklık ve diğer su şartlarında dahi koruyacak şekilde seçilmelidir.

Isı kaynağı olarak nehir genellikle kullanılmaz, çünkü; nehirler sel ve kuraklıktan etkilenerek, sistemin zarar görmesine neden olabilir.

Avantajları: Diğer kapalı sistem dizaynlarına göre daha az boru gerektirmesi, eğer kaynakta yeterli miktarda su varsa, diğer yer ısı değiştiricisi dizaynlarıyla karşılaştırıldığında, bu sistemin daha ucuz olması.

Dezavantajları: Çok fazla miktarda su gerektirmeleri.

3.1.1.2.2 Açık çevrimli sistemler

Açık sistemlerde; kapalı sistemlerdeki ısı taşıyıcı akışkan yerine, ısı kaynağı olarak kullanılan yer üstü/altı suyu, doğrudan ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanılır. Açık sistemler; öncelikle suyun çekildiği ana kuyulardan, ana ve enjeksiyon kuyularından veya yüzey su sistemlerinden oluşurlar. Bu üç durum, şekil 3.4’de 5.,6.,7. figürlerde gösterilmiştir.

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

Açık sistemleri tasarlarken birkaç özel faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci önemli faktör, kullanılan suyun kalitesidir. Açık çevrimli sistemlerde; soğutucu akışkan ile yer üstü veya altı suyu arasındaki ısı değiştiricisi, kirlenme, korozyon veya tıkanma tehlikesi ile karşı karşıyadır. İkinci önemli faktör, ısı kaynağı veya kuyusu olarak kullanılan su kütlesinin yeterliliğidir. Soğutucu akışkan ile yer üstü veya altı suyu arasındaki ısı değiştiricisinde birim soğutma yükü başına ihtiyaç duyulan su debisi genellikle, 0,027-0,054 lt/s-kW arasındadır. Üçüncü önemli faktör, dönüş suyunun ne yapılacağıının belirlenmesidir. Dönüş yer altı/üstü suyu, enjeksiyon kuyuları ile toprağa geri verilebildiği gibi göl, ırmak gibi yüzey sistemlerine aktarılabilir. Bu konuda yerel kanunlar veya düzenlemeler açık sistemin fizibilitesini etkileyebilir. Kuyu dizaynına bağlı olarak açık sistemler, tüm yer kaynaklı ısı değiştiricilerinin kurulumlarından daha fazla pompalama yüküne ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte ideal şartlarda bir açık çevrim uygulaması, yer ısı değiştirici sistemlerin içinde en ekonomik olanıdır.

Avantajları: Basit dizayn olanakları sağlaması, kapalı çevrimli sistemlere nazaran daha az delme masrafı gerektirmesi, bu sistemlerin genellikle maliyetinin düşük olması, içilebilir su temin eden kuyular ile kombine kullanılabilmesi, kapalı çevrimli sistemlerden termodinamik performansının daha iyi olmasıdır. Çünkü açık sistemli kuyularda ısı, doğrudan kaynaktan ve kaynak sıcaklığında sağlanırken, kapalı çevrimlerde ise ısı taşıyıcı akışkan vasıtasıyla, kaynak sıcaklığından daha farklı bir değerde ve daha az miktarda taşınır.

Dezavantajları: Her yerde yer altı veya üstü su kaynaklarının bulunmaması, çok fazla su gerektirmesi, suyun her zaman bulunamaması veya sınırlı miktarda bulunabilmesi, genellikle yüksek pompalama gücü gerektirmesi, hatta pompanın gereken kapasitenin üzerinde seçilmesi veya zayıf kontrol edilmesi durumunda aşırı miktarda pompalama gücü gerektirmesi, Kaynak suyunun tasarrufu için enjeksiyon kuyusunun kullanılması gerektiği durumlarda maliyetinin fazla olması, ısı pompası ısı değiştiricisi malzemesinin korozif etkiler ve bakteriyel içerik nedeniyle etkilenmesi.

3.1.1.2.3 Direkt genleşmeli sistemler

Yukarıda bahsedilen tüm yer ısı değiştiricisi sistemlerde; toprakla soğutucu akışkan arasında ısı transfer etmek için ortada ısı taşıyıcı akışkanlardan faydalanılır. Soğutucu akışkanla toprak arasındaki ısı transfer döngüsündeki sıcaklık farklarının yeterli derece edilmesi için toprakla soğutucu akışkan arasında ısıtıcı akışkan kullanılması, ısı pompası sisteminde sıkıştırma

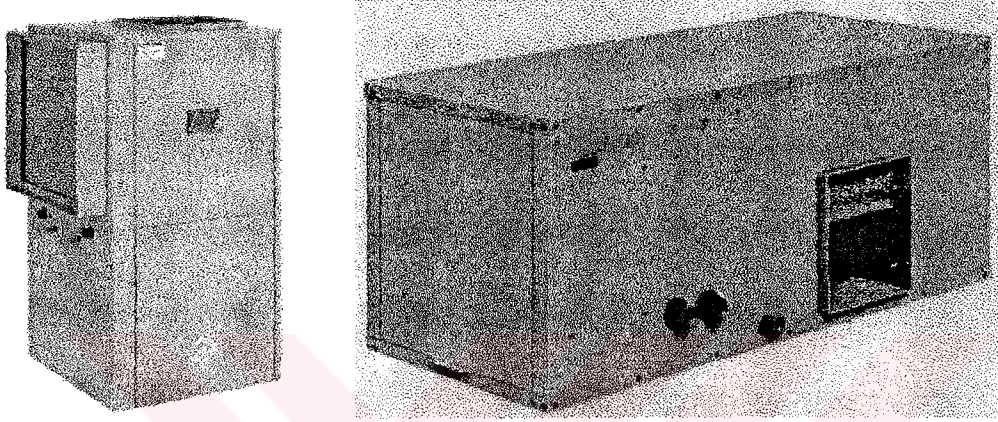
oranlarını yükseltir. Diğer açık ve kapalı çevrimli sistemler, ısı taşıyıcı akışkanı, ısı pompası ile toprak ısı değiştiricisi arasında sirküle etmek için pompa gerektirirler. Şekil 3.4'te 8. figürde gösterildiği gibi direkt genleşmeli sistemlerde; aradaki ısı taşıyıcı akışkana, ısı taşıyıcı akışkanla soğutucu akışkan arasındaki ısı değiştiricisine ve sirkülasyon pompasına gerek yoktur. Bakır borular soğutucu akışkan ile toprak arasındaki ısı transferini direkt olarak sağlamak için yerin altına yerleştirilirler. Sonuç olarak, ısı transferi karakteristikleri ve termodinamik performans artar. Borular, derin düşey çukurlara veya geniş yatay çukurlara gömülebilirler. Düşey tipler genellikle, birim soğutma yükü için $2,6-4,0 \text{ m}^2/\text{kW}$ arsa alanı gerektirirler ve genellikle $2,7-3,7\text{m}$ derinliğe yerleştirilirler. Yatay kurulum düzenleri de genellikle, birim soğutma yükü için $11,9-14,5 \text{ m}^2/\text{kW}$ arsa alanı gerektirirler ve genellikle $1,5-3,0\text{m}$ derinliğe yerleştirilirler. Düşey yerleşimler; kumlu, killi veya kuru topraklar için önerilmezler. Toprak ısı değiştiricisi metal olduğu için korozyona sebep olabilir. Toprağın PH değeri $5,5-10$ arasında olduğunda, normalde bu sorunla karşılaşılmaz. Eğer toprakta, serbest elektrik akımları ve/veya galvanik olaylar oluşuyorsa; bu sistemlerde katodik koruma sistemlerine ihtiyaç duyulabilir. Kışın ısıtma amaçlı kullanımda, düşük toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı nedeniyle topraktaki nem donabilir. Biriken buzun genleşmesi borulara basınç uygulayarak bükülmesine sebep olabilir. Bununla beraber bu donma potansiyeli toprak ısı değiştiricileri yer altı su tabakalarına yakın bölgelere yerleştirilmemelidir. Yazın soğutma amaçlı kullanımda, yüksek toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı nedeniyle topraktaki nemin buharlaşmasına sebep olabilir. Buna bağlı olarak nem miktarının değişmesi toprağın ısı transfer karakteristiklerini değiştirir. Toprakla direkt genleşmeli sistem arasında çok aşırı sıcaklık farkı mevcut olduğundan bu durumlar dizayn aşamasında göz önüne alınmalıdır. Bu sistem sadece ABD'de uygulanmaktadır. Sistem $7-17,6\text{kW}$ ısıtma ve soğutma kapasitelerinde hizmet vermektedir. Daha büyük ticari uygulamalarda çoklu ünite ile kullanılabilirler.

Avantajları: Daha yüksek sistem verimliliğine sahip olması, sirkülasyon pompası gerektirmemesi.

Dezavantajları: Sistemin efektif ısı transfer yüzeyi için geniş alana ihtiyaç duyması, toprak ısı değiştiricisi etrafında donma tehlikesinin mevcut olması, kompresör yağı dönüşünün daha karmaşık yapıda olması, sistemin daha fazla soğutucu akışkan gerektirmesi, genellikle ilk yatırım maliyetlerinin daha yüksek olması, özellikle düşey ısı değiştiricilerinde; veya sistemin hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanımında oluşabilecek sızıntıların, çevre için son derece tehlikeli olması.

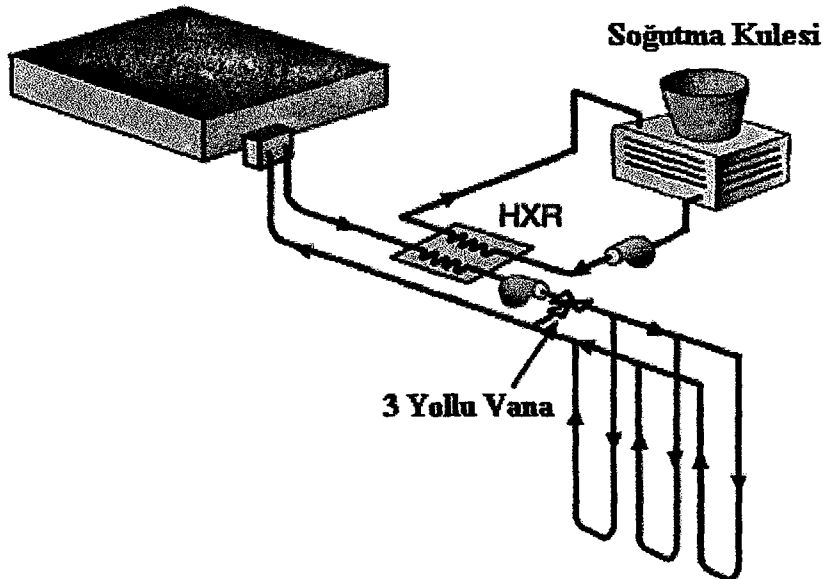
3.1.2 Yer kaynaklı ısı pompası

Yer kaynaklı ısı pompaları paket tip olup, klasik ısı pompası elemanları ile kontrol elemanlarını ve sıcak su üretimini sağlayan bir sistem içerir. Aynı zamanda, hava kanalı kullanarak ısı dağıtan sistemlerde; hava yönlendiricileri, fan, filtre ve iklimlendirme sistemi için yoğuşma suyu boşaltma sistemi bulunur. Şekil 3.9'da paket tip iki adet yer kaynaklı ısı pompasının resmi gösterilmiştir.



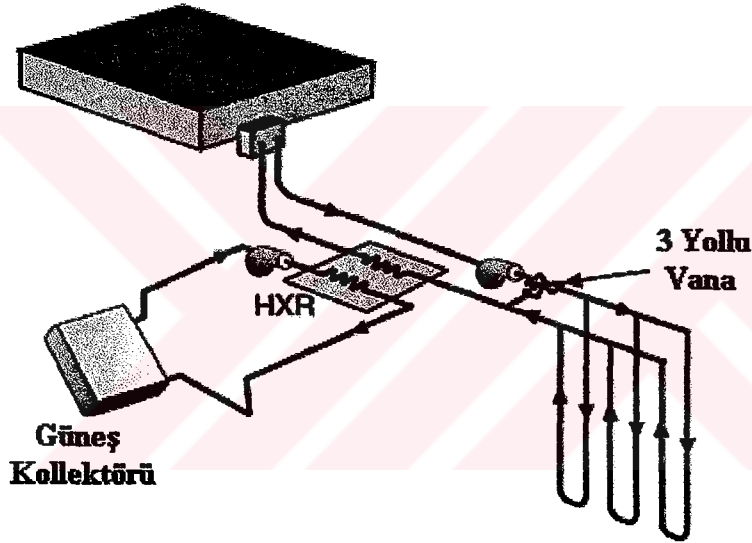
Şekil 3.9 Paket tip yer kaynaklı ısı pompaları.

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



Şekil 3.10 Soğutma kulesi ilave edilmiş sistem.

Güney iklim bölgelerinde veya ısı yükü fazla olan ticari uygulamalarda soğutma yükünün, sistem dizaynını zorlaştıran bir faktör olarak ortaya çıktığı durumlarda; ihtiyaç duyulan yer ısı değiştiricisinin uzunluğu, soğutma kulesinin sisteme yardımcı olarak ilave edilmesi ile azaltılabilir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, soğutma kulesi çevrimi, yer ısı değiştiricisinin dönüş kısmına bir ısı değiştirici vasıtasıyla bağlanır. Soğutma kulesi çevriminin akış yönü, yer ısı değiştiricisinin içindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış yönünün ters olacak şekilde dizayn edilerek, ısı taşıyıcı akışkana ön soğutma yapar. Dolayısıyla yer ısı değiştiricisinin içindeki ısı taşıyıcı akışkanın toprağa atması gereken ısı miktarı azalır. Bu anlamda soğutma kulesi kullanılarak ihtiyaç duyulan yer ısı değiştiricisi boyutları azaltılabilir. Dolayısıyla sistemin toplam ilk yatırım maliyetinin de azaltılması mümkündür. Bu sistem günümüzde birçok ticari yapılarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.



Şekil 3.11 Güneş kollektörü destekli sistem.

Kuzey iklim bölgelerinde ısıtma yükünün, sistem dizaynını zorlaştıran bir faktör olarak ortaya çıktığı durumlarda; ihtiyaç duyulan yer ısı değiştiricisinin boyutları, sisteme güneş kollektörlerinin ilave edilmesi ile azaltılabilir. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi güneş panelleri yer ısı değiştiricisinin binaya giriş kısmına bir ısı değiştirici vasıtasıyla bağlanır. Paneller, ısı taşıyıcı akışkana ilave ısı sağlarlar. Bu tür bir sistemle; ihtiyaç duyulan yer ısı değiştiricisi boyutları küçültüleceği gibi ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığı artırılarak, ısı pompası sisteminin verimliliği artırılabilir.

Yer kaynaklı ısı pompaları yaşam mahallerinin, ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyacının üçünü birden sağlamaktadır. Özellikle sulu ısıtma ve kullanma sıcak suyunun sağlanmasında kazan ve ekipmanlarına ihtiyaç ortadan kalmaktadır. Ayrıca bu sistemlerde yakıtların yakılmasıyla

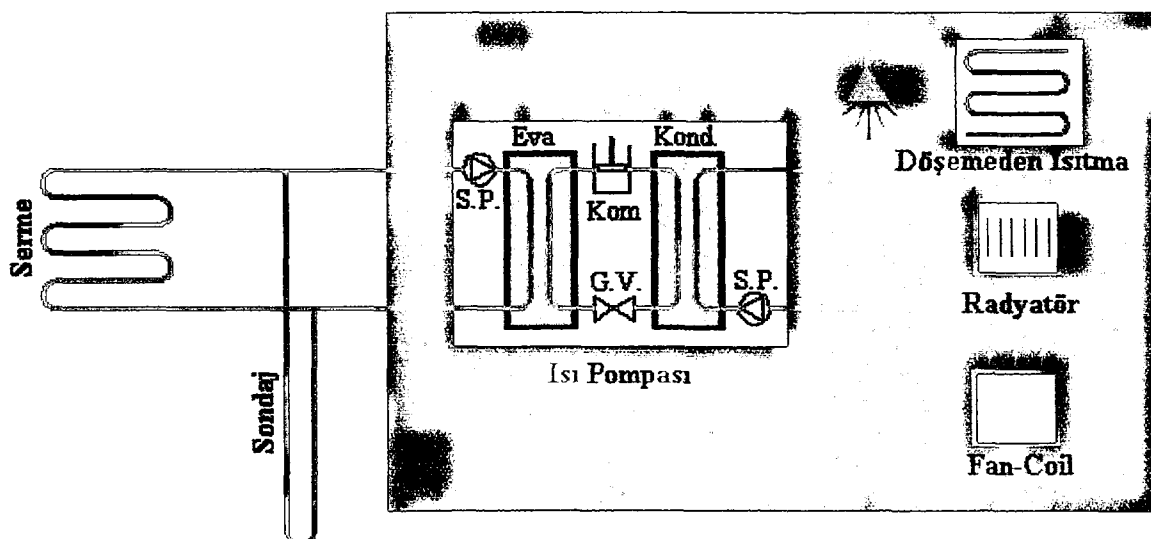
kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi yerine ısıнын topraktan taşınarak elde edilmesi esas alındığından; yakıt temini, depolanması ve maliyeti ortadan kaldığı gibi bu fosil kaynaklı yakacakların yakılmasıyla açığa çıkan çevre kirliliğinin de önüne geçilmiş olur. Tüm bunların yanı sıra yer kaynaklı ısı pompalarının kullanımı için özel bir elemana gerek yoktur.

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

3.1.3 Dağıtım sistemi

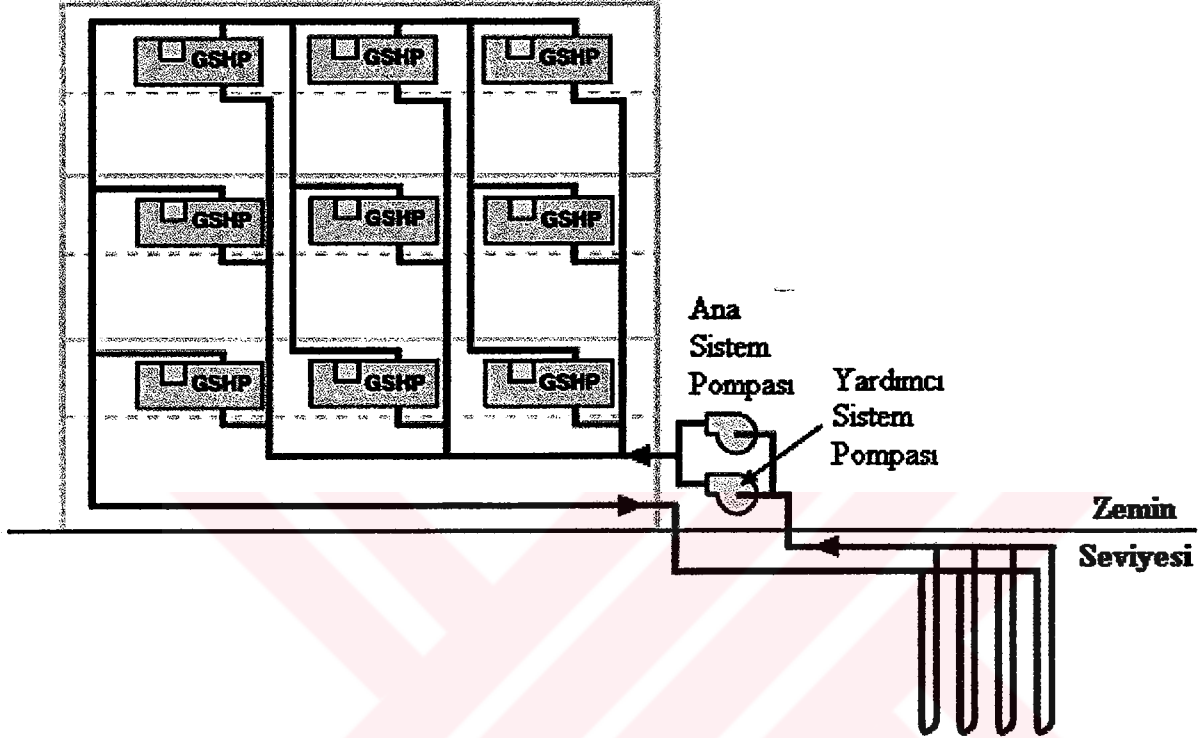
Dağıtım sistemi; ısı pompasının yaşam mahaline ısıyı aktarırken kullandığı ısı taşıyıcı akışkana göre tesis edilir. Burada ısı taşıyıcı akışkanlar hava ve su olabilirler. Havalı sistemlerde, sıcak veya soğuk havayı dağıtmak için alışla gelmiş hava dağıtım kanalları kullanılır.

Sulu sistemlerde ise ısıtma, radyatör sistemleri ile döşemeden ısıtma sistemleri kullanılır. Isıtmanın yanı sıra binanın soğutma ihtiyacı mevcut ise fan-coil sistemi tercih edilmelidir. Şekil 3.12’de sulu dağıtım sistemine sahip bir yer kaynaklı ısı pompasının işleyişi gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Yer kaynaklı ısı pompasının işleyişi ve ısı dağıtım sistemi seçenekleri.

Okullar ve ofisler gibi büyük ticari yapılarıdaki sistemlerde zonlamaya göre, belki her bir sınıf veya ofis için bir adet olmak üzere çoklu ısı pompaları kullanılarak, yapının içindeki bir çevrimle aynı toprak ısı değiştiricisine bağlayarak yapılabilir. Isı dağıtımını her mahal için bağımsız olarak yaparak her bir alanın ayrı olarak kontrol edilmesi mümkündür, (Şekil 3.13)

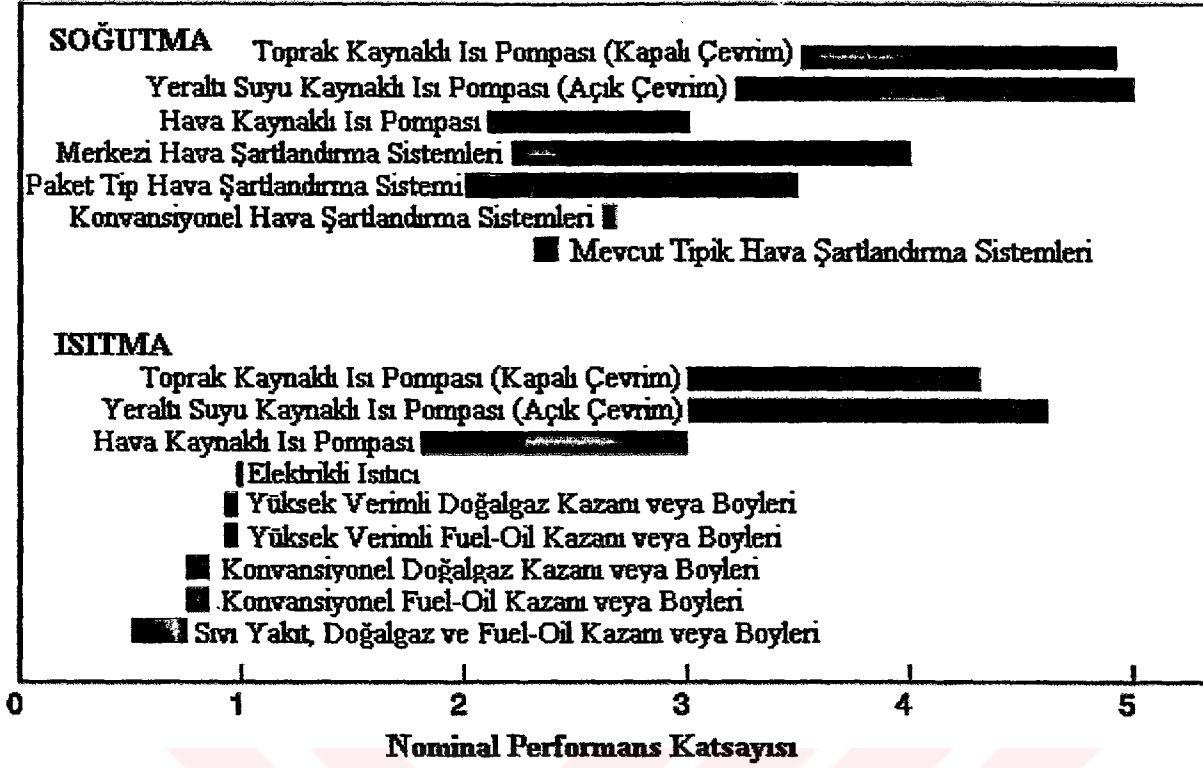


Şekil 3.13 Çoklu ısı pompası sistemi ile ısı dağıtımı.

3.2 Yer Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları

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

Yer kaynaklı ısı pompaları uygun şekilde tasarlandığı zaman, ısı dağıtım sistemi çevrimlerindeki ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığı ekipmanın, alışıl gelmiş hava kaynaklı ısı pompaları ve fosil yakıtlı düzeneklerden daha yüksek bir etki katsayısıyla ve ekonomik olarak işletilmesini sağlar. Şekil 3.14'te değişik sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.14 Değişik sistemlerin performanslarının mukayesesi.

Isı dağıtımı sonunda tekrar ısınmak veya soğumak için kondensere giren su (ısı taşıyıcı akışkan) sıcaklığı, hava kaynaklı ısı pompalarındaki dönüş havasının sıcaklığından, daha düşük olduğundan kompresör daha düşük güç ihtiyacı gerektirerek, düşük soğutucu akışkan basınç farklarında işletilir. Bu durum $\ln P-h$ diyagramında kondenser basıncının evaporatör basıncına yaklaşmasıyla kendini gösterir. Isı dağıtım sisteminin çevrim sıcaklıkları, dış hava sıcaklıklarıyla çok az değişir. Bu yüzden sağlanan ısıtma veya soğutma kapasitesi daha kararlı bir yapıdadır. Yer kaynaklı ısı pompaları aynı zamanda, büyük yapılarda yaygın olarak kullanılan merkezi ve değişken hava debili sistemlere kıyasla, çok daha küçük fan ve pompa enerjisi gerekli kılar.

Karmaşık kontrol sistemleri, konforu ve kısmi yükteki etkinliği sağlamak için gerekli olmadığından dolayı yer kaynaklı ısı pompası sisteminin maliyetini arttırmamak amacıyla pahalı ve özel cihazların kullanılmaması önerilir. Her zonda optimum konforu sağlamak için yerel olarak kontrol edilebilen ayrı bir ısı pompası bulunarak ısıtma veya soğutma sağlanabilir.

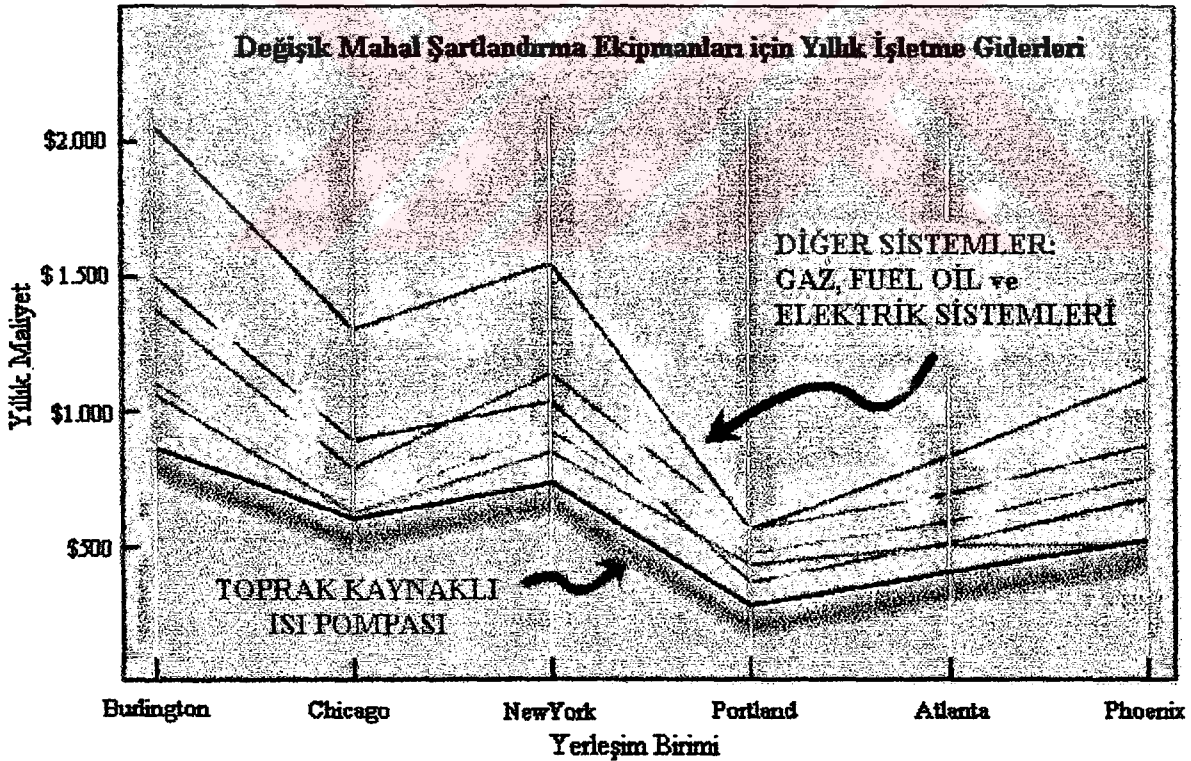
Yer kaynaklı ısı pompaları, göze hoş görünmeyen dış ünite olmadan kurulabilirler. Böylece dış etkenler, korozyon ve hava etkisi ile oluşabilecek sorunlara rastlanmaz. Tüm ısı pompası ekipmanı iç ünite şeklindedir. Bu ısı pompası elemanları, dış üniteli alışla gelmiş

sistemlerdeki ekipmanlarda ortaya çıkan yüksek veya düşük soğutucu akışkan basınçlarıyla asla karşılaşmazlar.

Yer kaynaklı ısı pompaları tasarımı, önemli ölçüde esneklik sağlarlar. Çünkü; değişik boyut ve yerleşim şekillerinde tasarlanabilirler.

Çoğu ticari yapılarda, iç yüklerden dolayı soğutma sistemleri ile yutulan ve çevreye atılan bir atık ısı mevcuttur. Bu atık ısı yer kaynaklı ısı pompalarıyla sıcak su ihtiyacının karşılamak amacıyla kullanılabilir. Bu seçilen ısı pompalarındaki ısı geri kazanım serpantinleriyle veya sıcak su ihtiyacının karşılamak amacıyla kurulan su / su ısı pompalarıyla yapılabilir.

Yer kaynaklı ısı pompalarının ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen; enerji ve talep giderlerinin ile bakım giderlerinin düşük olması ve ekipman ömrünün uzun olması sebebiyle yapım-kullanım ömrü boyunca meydana gelen işletme giderleri göz önüne alındığında diğer sistemlerden daha avantajlıdır. (Şekil 3.15)



Şekil 3.15 Değişik mahal şartlandırma ekipmanları için yıllık işletme giderleri.

Tüm bu avantajlara karşılık yer kaynaklı ısı pompasının kullanımını kısıtlayan en önemli faktörler; bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin daha yüksek olması, jeotermal ısı kaynaklarına olan ilgisizlik ve gerek sistemi tasarlayacak gerekse sistemi kuracak yeterli

sayıda nitelikli elemanların bulunmamasıdır. Çizelge 3.2’de toprak ısı değıştircisinin tipine göre, yer kaynaklı ısı pompalarının yararları ve sakıncaları gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Yer kaynaklı ısı pompalarının yararları ve sakıncaları.

SİSTEMLER	YARARLARI	SAKINCALARI
Yatay toprak ısı değıştircili ısı pompası	- Enerji tüketiminin düşük olması - İşletme giderlerinin orta düzeyde olması - Performansının hava kaynaklı sistemlerinden daha iyi olması	- Kuru toprağın sudan daha kötü ısı kaynağı ve kuyusu olması - İlk yatırım masraflarının yüksek olması - İlave pompalama giderlerinin olması - Çok fazla açık alan gerektirmeleri
Düşey toprak ısı değıştircili ısı pompası	- Enerji tüketiminin düşük olması - İşletme giderlerinin orta düzeyde olması - Performansının hava/hava ısı pompası sistemlerinden daha iyi olması	- Kuru toprağın sudan daha kötü ısı kaynağı ve kuyusu olması - İlk yatırım masraflarının yüksek olması - İlave pompalama giderlerinin olması - Derin kuyuların çukur kazmaktan daha pahalı olması
Yüzey suyuna daldırılmış ısı pompası	- Enerji kaynağının verimli olması - İşletme giderlerinin orta düzeyde olması - Hava kaynaklı ısı pompalarında olduğu gibi defrost çevrimi gerektirmemesi	- Uygun su yerlerinin bulunabilirliğinin sınırlı olması - Sistemin; tıkanma, kirlenme veya korozyon etkilerine maruz kalması - Akıntı veya dalga etkisinin cihaza zarar verebilme olasılığı - İlk yatırım masraflarının yüksek olması - İlave pompalama giderlerinin olması

4. YER ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDEKİ ISI TRANSFERİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR

Bu bölümde toprak ile toprak ısı değiştiricisi içinde dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkan arasında oluşan zamana bağlı geçici rejimdeki ısı transferinin hesaplanabilmesi ve toprağın sıcaklık zamana ve derinliğe bağlı değişiminin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için gerekli olan denklemler elde edilmeye çalışılacaktır.

4.1 Fourier İfadesi ve Kabuller

Bir cisim içerisinde sıcaklık basamağı meydana geldiğinde, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru enerji geçişi meydana gelir. Bu cisim katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Sıvı ve gazlarda atom ve moleküllerin hareket etmeksizin birbirine teması sonucu sıcaklık farklılıklarından dolayı ısı enerjisinin geçmesi de ısı iletimi ile gerçekleşmektedir. İletim ile geçen ısı enerjisini ilk ifade eden Jean B. Joseph Fourier olduğundan bu ifadeye “**Fourier ısı iletim kanunu**” denilmiştir. (Dağsöz, 1990)

Isı iletiminin ana ifadesi Jean B. Joseph Fourier tarafından,

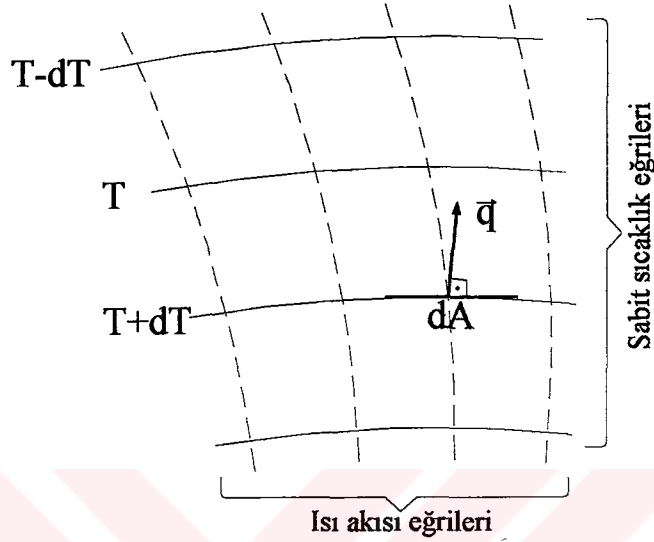
$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.1)$$

şeklinde verilmiştir. Bu ifadeye göre birim alandan birim zaman zarfında geçen q ısı miktarı, ısı transferinin olduğu yüzeyin normali doğrultusundaki $\partial T / \partial n$ sıcaklık gradyeni ile orantılıdır ve k orantı katsayısı “**ısı iletim katsayısı**” olarak adlandırılır. Sıcaklık gradyeni birim uzunluk başına sıcaklık düşmesini gösterdiğine göre, uzunluk arttıkça sıcaklık azalacağından ifadenin önüne eksi işareti gelmiştir.

Sıcaklık en genel durumda yere ve zamana bağlıdır. Eşitlik (4.2) sıcaklık alanının matematiksel ifadesidir.

$$T = T(\vec{r}, t) \quad (4.2)$$

Verilen bir noktada sıcaklık zamana göre değişmiyorsa sürekli rejimden bahsedilir. Eşit sıcaklık noktalarının birleştirilmesi ile oluşan yüzeylere eş-sıcaklık yüzeyleri denir. Bir noktada değişik iki sıcaklık bulunamayacağından eş-sıcaklık yüzeyleri birbirlerini kesmezler. Sıcaklık skaler bir büyüklüktür ve şekil 4.1’ de $T-dT$, T ve $T+dT$ eğrileri sabit sıcaklık yüzeylerini göstermektedir.



Şekil 4.1 Sabit sıcaklık ve ısı akısı eğrileri.

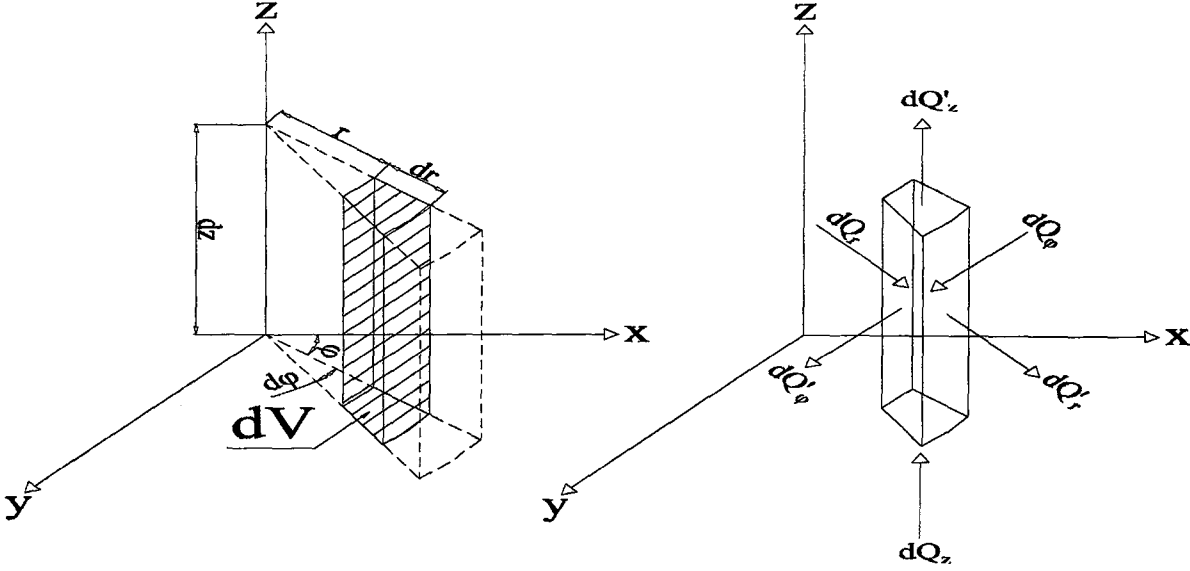
Şayet dA kesitinden dt zaman zarfında geçen ısı miktarı düşünülürse (4.1) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dQ = -k \cdot dA \frac{\partial T}{\partial n} dt \quad (4.3)$$

Isı transferi problemlerinin çözümünün kolaylaştırılması amacıyla bir takım kabuller yapılabilir. Tezimizde aşağıdaki kabuller esas alınmıştır.

- Cisimlerin özgül ısıları ve özgül ağırlıkları değişmemektedir.
- Isı iletim katsayısı tüm sıcaklık aralığında sabit kalmaktadır.
- Cisim homojen yapı özelliğindedir.
- Isı iletim katsayısı cismin her doğrultusunda aynı olmaktadır.
- Maddesel durum değişimi yoktur.

4.2 Üç Boyutlu Isı İletiminin Polar Koordinat Sisteminde En Genel İfadesi



Şekil 4.2 Silindirik koordinatlarda üç boyutlu ısı iletimi.

Şekil 4.2’de görüleceği gibi dV hacim elemanında en genel halde giren ısı, çıkan ısı, üretilen ısı ve depo edilen ısı olmak üzere dört ayrı ısı söz konusudur ve dt zaman aralığında söz konusu ısılar arasındaki denge; aşağıdaki gibi ifade edilebilir. (Dağsöz, 1990)

İletimle elemana giren ısı miktarı		Eleman içinde üretilen ısı miktarı		Elemanı iletimle terk eden ısı miktarı		Elemanın iç enerji artışı	
dQ_g	+	$dQ_{\dot{u}}$	=	$dQ'_{\dot{\phi}}$	+	dQ'_d	(4.4)

Fourier kanuna göre dt zaman aralığında giren ısılar,

$$\bullet \quad dQ_r = -k \cdot (r \cdot d\phi \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dt \quad (4.5)$$

$$\bullet \quad dQ_{\phi} = -k \cdot (dr \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{r \cdot \partial \phi} \cdot dt \quad (4.6)$$

$$\bullet \quad dQ_z = -k \cdot (r \cdot d\phi \cdot dr) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dt \quad (4.7)$$

olarak elde edilir.

Fourier kanuna göre dt zaman aralığında çıkan ısılar,

$$\bullet \quad dQ'_r = -k \cdot ((r + dr) \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr \right) \cdot dt \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} dQ'_r &= -k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dt - k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \cdot dr \cdot dt - k \cdot (dr \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dt \\ &\quad - k \cdot (dr \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \cdot dr \cdot dt \end{aligned} \quad (4.9)$$

1 4 4 4 4 2 4 4 4 4 3
ihmal

$$dQ'_r = -k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot dt - k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \cdot dr \cdot dt - k \cdot r (dr \cdot d\varphi \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{r \cdot \partial r} \cdot dt \quad (4.10)$$

$$\bullet \quad dQ'_\varphi = -k \cdot (dr \cdot dz) \cdot \frac{\partial}{r \cdot \partial \varphi} \left(T + \frac{\partial T}{r \cdot \partial \varphi} r \cdot d\varphi \right) \cdot dt \quad (4.11)$$

$$dQ'_\varphi = -k \cdot (dr \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{r \cdot \partial \varphi} \cdot dt - k \cdot r \cdot d\varphi \cdot (dr \cdot dz) \cdot \frac{\partial^2 T}{r \cdot \partial \varphi^2} \cdot dt \quad (4.12)$$

$$\bullet \quad dQ'_z = -k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dr) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz \right) \cdot dt \quad (4.13)$$

$$dQ'_z = -k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dr) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot dt - k \cdot (r \cdot d\varphi \cdot dr) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cdot dz \cdot dt \quad (4.14)$$

olarak elde edilir.

Cismin içinde birim zamanda ve birim hacimde $\dot{q}$ miktarında ısı üretildiğine göre dV hacim elemanı için üretilen ısı,

$$dQ_{\dot{u}} = \dot{q} r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot dt \quad (4.15)$$

cismin sıcaklığının artması nedeniyle depo edilen ısı,

$$dQ'_d = \rho \cdot c \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad (4.16)$$

olup (4.4) eşitline göre ve gerekli ara işlemler de yapılarak;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho \cdot c} \quad (4.17)$$

silindirik koordinatlarda üç boyutlu en genel ısı iletimi denklemi elde edilir. Bulunan denklemdeki

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (4.18)$$

terimi “ısı yayılma katsayısı” olarak adlandırılır.

En genel halde üç boyutlu ısı iletimi denkleminin değişik koordinat sistemlerinde ifade edilişi aşağıda gösterilmiştir (Incompera ve Dewitt, 1990).

Kartezyen koordinatlarda;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho \cdot c} \quad (4.19)$$

Silindirik koordinatlarda;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho \cdot c} \quad (4.20)$$

Küresel koordinatlarda;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\cos \varphi}{r^2 \sin \varphi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho \cdot c} \quad (4.21)$$

4.3 Başlangıç ve Sınır Şartları

Isı geçişi problemlerinin çözümlerinde sabitlerin bulunması için bazı nokta, yüzey ve yerlerdeki sıcaklık, ısı geçişi, başlangıçtaki durumu ile ilgili hususların belirlenmesi gerekir. Bu hususlar, sınır şartları ve başlangıç şartları olarak adlandırılır. Diferansiyel denklemin çözümü için herhangi bir değişken yönünde bilinmesi gereken sınır şartlarının sayısı, diferansiyel denklemin aynı yöndeki türevinin en yüksek mertebesine eşittir.

4.3.1 Başlangıç şartı

Cismi sınırlayan yüzeylerin sıcaklığının belirli olması hususudur. Geçici rejimde ısı iletimi problemlerinin çözümü için, işlemin başlangıcı olan $t=0$ anında sistem içerisindeki sıcaklık dağılımının verilmesi gerekir. En genel halde sıcaklık $T = T(x,y,z,t)$ olmak üzere 4 değişkene bağlıdır. Matematiksel olarak, $t=0$ anında $T(x,y,z,t) = T(x,y,z,0)$ olacağından, başlangıç şartı;

$$T(x,y,z,0) = T_i(x,y,z) \quad (4.22)$$

olarak yazılabilir. Çözüm, $t=0$ anında başlangıç şartı sistem sistemin her noktasında sağlanmalıdır. Şayet yüzeyin her noktasında sıcaklık aynı değeri muhafaza etmekteyse, izotermik durum söz konusudur (Dağsöz, 1990).

4.3.2 Sınırdaki ısı akısının belirtilmesi

Cismi sınırlayan yüzeylerdeki ısı akısının belirli olması hususudur. Yüzeyde ısı geçişi mevcut değil ise, adyabatik durum söz konusudur. Bu halde yüzey için;

$$q_y = \frac{Q_y}{A} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_y = 0 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_y = 0 \quad (4.23)$$

ifadesi yazılır. Şayet yüzey akısı sabit ise ifade;

$$q_y = \frac{Q_y}{A} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_y = \text{sabit} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_y = \text{sabit} \quad (4.24)$$

olarak yazılmalıdır. (Dağsöz, 1990)

4.3.3 Sınırdaki taşınım ile ısı transferinin belirtilmesi

Cismi sınırlandıran herhangi bir yüzeyin temas ettiği akışkan ortamın sıcaklığı T_a ise ve $T_y > T_a$ olmak üzere geçen ısı “Newton’un Soğuma Kanunu” ifadesi ile belirlidir.

$$Q_y = \alpha \cdot A \cdot (T_y - T_a) \quad (4.25)$$

Bu ısı, cismin içinde ve tam yüzeyindeki iletim yoluyla olan ısı geçişine eşit olup aşağıdaki eşitlik yazılabilir. (Dağsöz, 1990)

$$\alpha \cdot A \cdot (T_y - T_a) = -k \cdot A \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_y \quad (4.26)$$

4.3.4 Zamana bağlı şart

Zamana bağlı rejim halinde $t = 0$ başlangıç anındaki sıcaklıklar verilerek sıcaklığın zamana göre değişiminin bilinmesi arzu edilir. (Dağsöz, 1990)

4.5 Bir Boyutlu Periyodik Isı Transferi

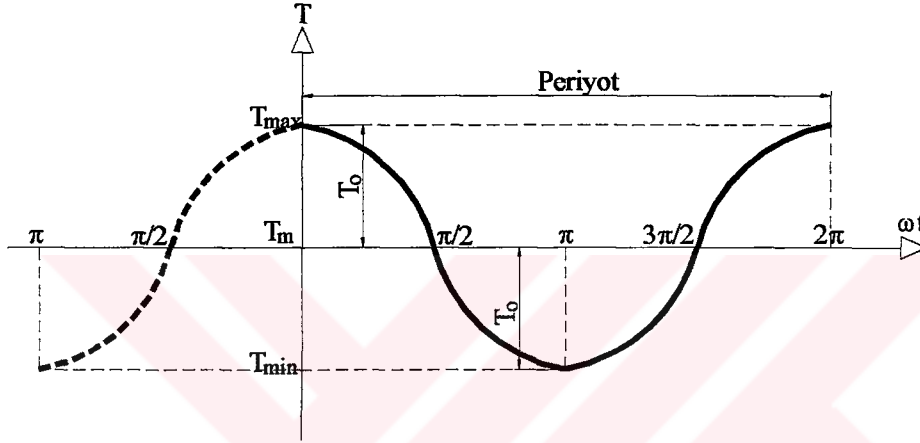
Isı kaynağı ve kuyusu olarak kullanılacak olan toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin belirlenebilmesi için sınırları düzlemsel olan ortamda kartezyen koordinatlarda bir boyutlu periyodik ısı transferini incelenmemiz gerekir.

Toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin belirlenebilmesi için; toprağın yüzeyindeki yıllık veya aylık sıcaklık değişimlerinin bilinmesi gerekir. Yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı değişimini; deneysel olarak ölçümü yapan kuruluştan (ülkemizde Meteoroloji) elde edilebilmek mümkün olduğu gibi Penny ve Edwards’ a (1996) göre mevcut yerin hava sıcaklıkları kayıtlarından da faydalanmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Gerek meteoroloji’deki yüzey sıcaklıkları verilerinden, gerekse de hava kayıtlarından; toprak sıcaklığının yaz ortasında maksimum, kış ortasında minimum değere haiz olduğu ve zamana bağlı sıcaklık değişiminin sinüs veya kosinüs dalgalanmalarına çok yakın bir seyir izlediği gözlenecektir. Dolayısı ile toprağın sıcaklığının belirli bir derinlikte zamanla periyodik olarak değiştiği kabul etmek mümkündür.

Buradan yola çıkarak toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin matematiksel olarak ifade etmek için yüzeydeki toprak sıcaklığı değişimini;

$$T(0,t) = T_m + T_o \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.27)$$

olarak yazabiliriz. Burada; T_m : Yıllık ortalama sıcaklık, T_o : Mevsimlik sıcaklık değişiminin genliği, ω : Açısal hız' dır. Denklem (4.27)' de t yerine "sıfır" değeri girildiğinde yüzeydeki toprak sıcaklığının maksimum değeri elde edilir. (Şekil 4.3)



Şekil 4.3 Matematiksel olarak öngörülen toprak sıcaklığı değişimi.

Şimdi problemimiz olan bir boyutlu periyodik ısı iletimi denklemini çözmeye çalışalım. Problem aşağıdaki formda yazılabilir,

$$U(x,t) = A(x) \cdot \cos(\omega \cdot t) = V(x) \cdot \cos(\omega \cdot t) + W(x) \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.28)$$

Isı transferinin kartezyen koordinatlarda sadece bir boyutlu yüzeye dik yönde olduğu ve ortamda herhangi bir ısı üretiminin olmadığı düşünülürse, çözümümüze temel oluşturan Fourier ısı iletim denklemi (4.20), aşağıdaki hale dönüşür.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (4.29)$$

İşlemleri kolaylaştırmak amacı ile toprağın yüzeydeki sıcaklık dağılımı ifadesine $U(x,t) = T(x,t) - T_m$ dönüşümünü yapılırsa; denklem (4.27)' yi aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$U(0,t) = A_o \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.30)$$

(4.28) denklemiindeki $U(x,t)$ ifadesi kompleks fonksiyon olarak ifade edebiliriz.

$$\tilde{U}(x,t) = X(x) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (4.31)$$

$\tilde{U}(x,t)$ ifadesini elde ettiğimiz temel denklemler olan (4.29) ve (4.30)' a koyalım;

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x^2} \quad (4.29')$$

$$\tilde{U}(0,t) = A_o \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (4.30')$$

Eğer denklem (4.31)' i , denklem (4.29')' de yerine koyarsak $i \cdot \omega \cdot X = k \cdot X''$ eşitliğini elde ederiz. Buradan $\sqrt{i} = \pm(1+i)/\sqrt{2}$ olduğundan ;

$$\alpha = \pm \sqrt{\frac{i \cdot \omega}{a}} = \pm(1+i) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (4.32)$$

Temel denklemimiz aşağıdaki haline dönüşür.

$$X'' - \alpha^2 X = 0 \quad (4.33)$$

Buradan temel denklemimiz (4.33) ifadesinin genel çözümü;

$$X(x) = A \cdot e^{-(1+i) \cdot x \sqrt{\omega/2a}} + B \cdot e^{+(1+i) \cdot x \sqrt{\omega/2a}} \quad (4.34)$$

olarak elde edilir. Sırasıyla $\tilde{U}(x,t)$, ve buradan $X(x)$ ifadelerinde $x \rightarrow \infty$ yaklaşımı yaparsak $B=0$ olması zorunluluğu ortaya çıkar. Aynı zamanda denklem (4.30') ve (4.31)' den $A=X(0)=T_o$ olduğunu görebiliriz. Öyleyse;

$$X(x) = A \cdot e^{-(1+i) \cdot x \sqrt{\omega/2a}} \quad (4.35)$$

olmalıdır. Sonuç olarak (4.29) ve (4.30) denklemlerinin çözümü;

$$U(x,t) = \text{Re } \tilde{U}(x,t) = \text{Re } X(x) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} = \text{Re} \left(A_o e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-(1+i) \cdot x \sqrt{\omega/2a}} \right) \quad (4.36)$$

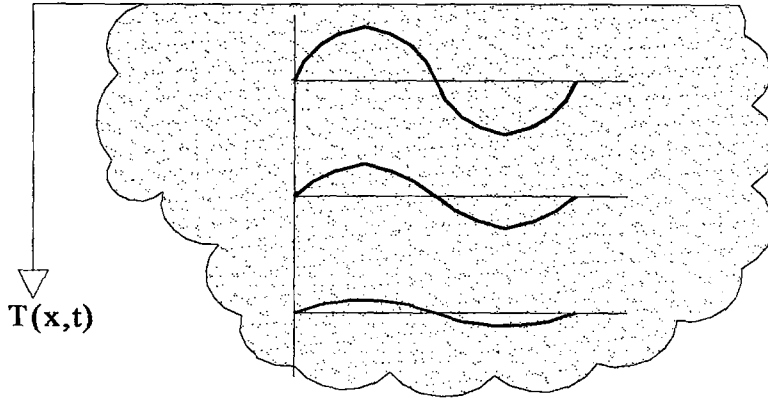
$$U(x,t) = \text{Re} \left(A_o e^{-x \sqrt{\omega/2a}} \cdot e^{i \cdot (\omega \cdot t - x \sqrt{\omega/2a})} \right) \quad (4.37)$$

olmaktadır ve buradan da;

$$U(x,t) = T_o e^{-x \sqrt{\omega/2a}} \cdot \cos \left(\omega \cdot t - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right) \quad (4.38)$$

olarak elde edilir (Penny ve Edwards (1996)).

Şekil 4.4'te toprak sıcaklığı değişiminin, derinliğin artması ile azaldığını görmek mümkündür. Dolayısı ile her derinlikte ayrı T_o değerlerinden söz edilmelidir. Buradan yola çıkarak sıcaklık dalgalanmalarının derinlikle ilişkisini gösteren bir ifadenin çözüm olarak sunulan denklem (4.38)' de yer alması gerekmektedir. Denklem (4.38)' de $T_o e^{-x \sqrt{\omega/2a}}$ ifadesi T_o genliğinin derinlikle değişimini doğru olarak ifade etmektedir. Şekil 4.4'te toprak sıcaklığı değişiminin, derinliğin artması ile azaldığından yola çıkılarak belli bir derinlikte; T_o genliğinin sıfıra eşit olduğu ve toprak sıcaklığının T_m değerinde sabit kaldığı sonucuna varılabilir. Bu derinlikte toprak sıcaklığı, dış etkenlerden etkilenmemektedir.



Şekil 4.4 Toprak sıcaklığı değişiminin derinlikle ilişkisi.

Herhangi bir derinlikte tüm zaman aralığı boyunca sıcaklık değişimi, denklem (4.38)' deki

$\cos\left(\omega \cdot t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ terim ile ifade edilmiştir. Söz konusu terimin -1 olduğu anda toprak sıcaklığı minimum değerini alırken, +1 sonucunu verdiği anda toprak sıcaklığı maksimum değerine ulaşır. Dolayısı ile tüm zaman aralığı boyunca sıcaklık değişiminin miktarı aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} = 2T_o e^{-x\sqrt{\omega/2a}} \quad (4.39)$$

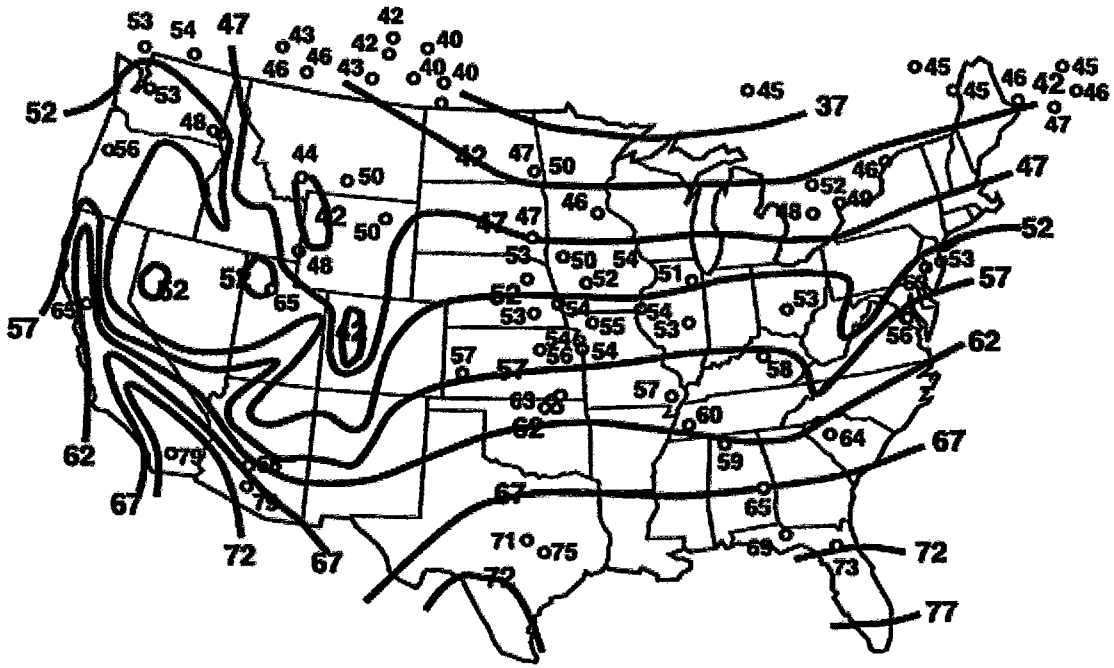
Bu ifadeden de görüleceği gibi sıcaklık değişiminin miktarı, derinliğin artmasıyla azalmakta ve belli bir derinlikten itibaren sıcaklık değişiminin ortadan kalkmasıyla toprak sıcaklığı zaman ve derinlikten bağımsız olarak sabit kalmaktadır. Şekil 4.5 ve şekil 4.7, vasıtasıyla da sıcaklık değişiminin derinliğin artmasıyla azaldığını da görmek mümkündür.

Denklem (4.27)' de yapılan $T(x,t) = U(x,t) + T_m$ dönüşümü denklem (4.38)' ya uygulanırsa toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı değişimi matematiksel olarak bir denklemle ifade edilmiş olur.

$$T(x,t) = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\omega/2a}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (4.40)$$

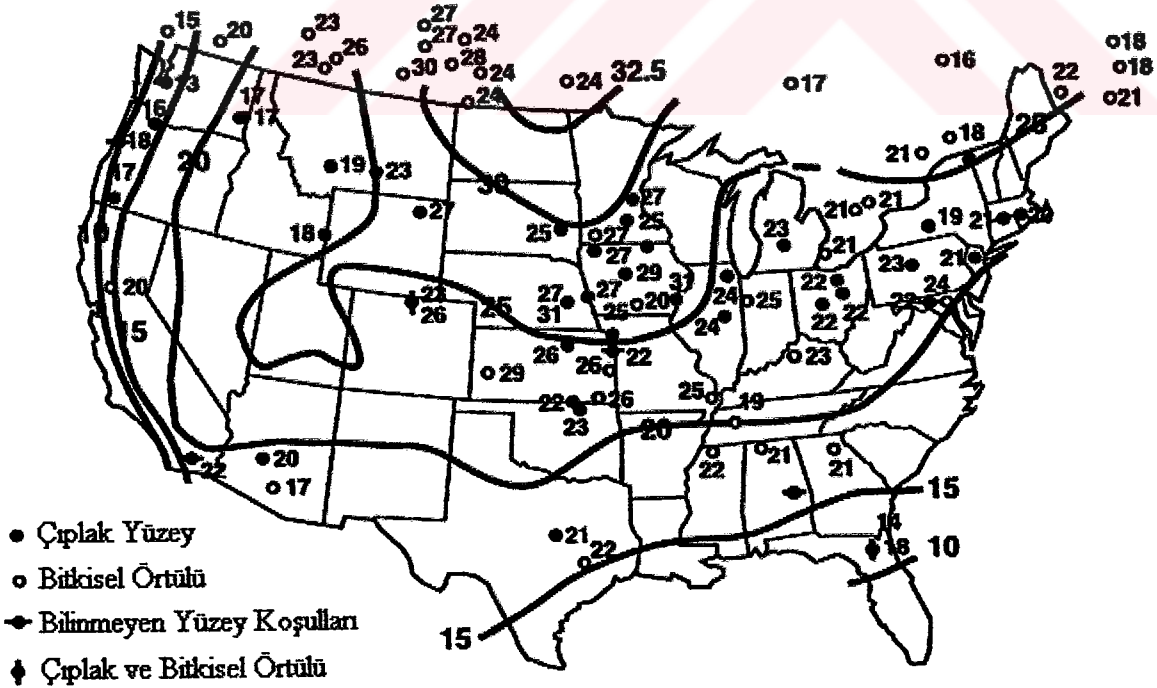
Denklem (4.40) ile sadece yüzeydeki toprak sıcaklığının zamana bağlı olarak değişiminin bilinmesi ile toprağın, herhangi bir derinlikte ve herhangi bir zamandaki sıcaklığını hesaplamak mümkündür.

Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı değişiminin bilinmesi ile ısı kaynağı ve/veya kuyusu olarak kullanılacak toprağın, ısı çekme ve/veya ısı verme beklentilerine hangi derinlikte cevap verebileceği ve tasarlanan derinlikte inşa edilmiş ısı değiştirici içindeki ısı taşıyıcı akışkanın yıl içerisinde donma tehlikesi ile karşı karşıya kalıp kalmayacağı hakkında fikir verir. Toprak ısı değiştiricisinin gömme derinliği, ekonomik analizlerinde etkisi göz önüne alınarak belirlenmelidir. Nitekim derinliğin artması ile toprak sıcaklığının; kışın artması ve yazın azalması ısı kaynağının ısı verme /çekme potansiyelini arttırmasına rağmen, bu derinliklere ulaşmanın yaratacağı mali külfetlerle optimizasyon yapılarak, tesisin kurulacağı derinliğe karar vermek gerekir.



(a) Ortalama Toprak Sıcaklığı, T_m (°F)

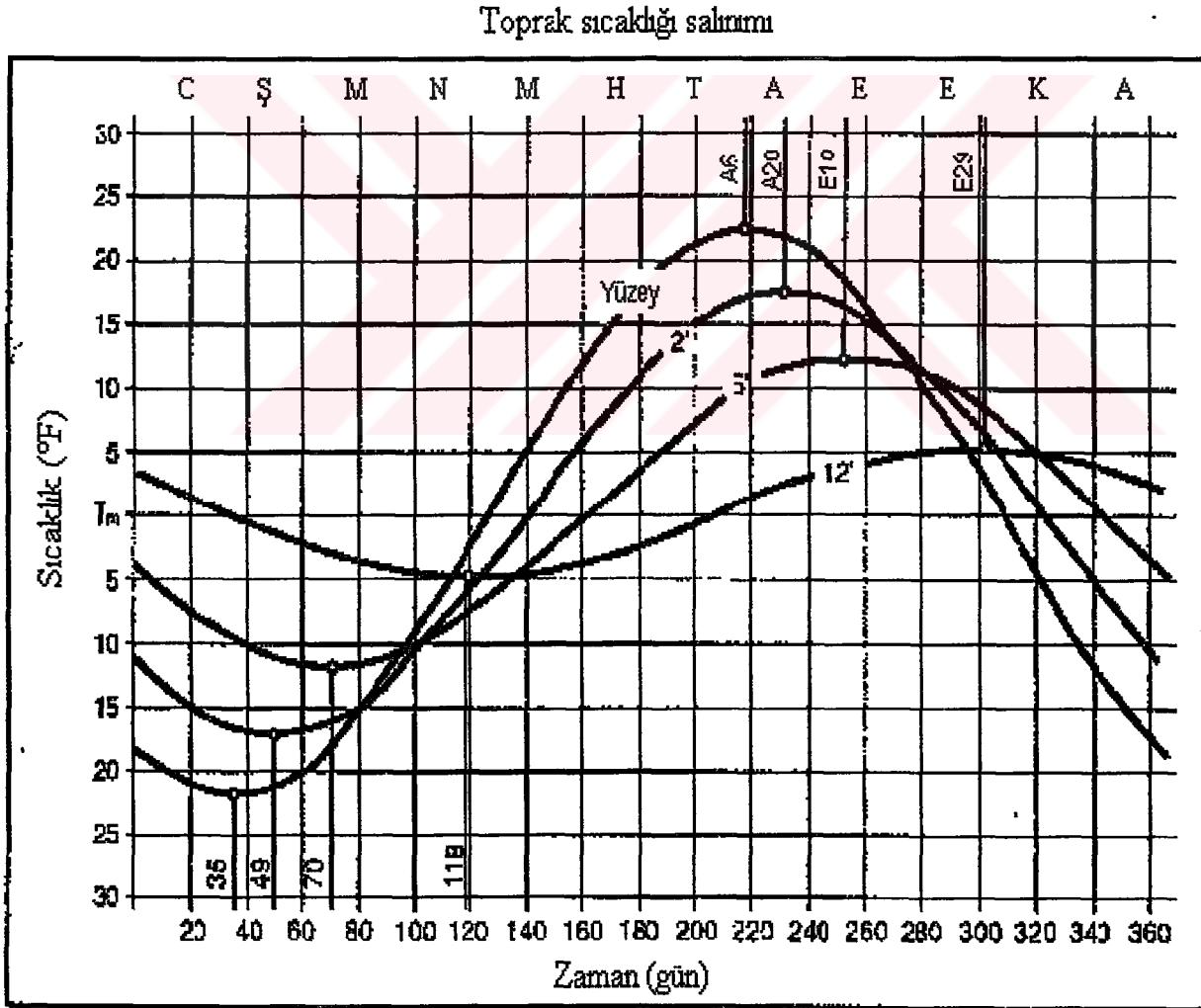
Şekil 4.5a A.B.D için ortalama toprak sıcaklıkları



(b) Toprak Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi Miktarı, T_o (°F)

Şekil 4.5b A.B.D için yüzeydeki sıcaklık değişimi miktarı

Şekil 4.6'da gösterilen grafik; pratik amaçlara uygun olarak denklemin uygulanması sonucunda elde edilmiştir. Toprak sıcaklıklarının zamana ve derinliğe bağlı değişimleri her bölge için farklı değerle sahip T_m değişkenine bağlı olarak ifade edilmiştir. T_m ; yıllık ortalama toprak sıcaklığı'dır ve şekil 4.5a ve şekil 4.5b'den de görüldüğü gibi A.B.D' deki her eyalet için söz konusu eyaletlerde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Gene bu deneysel çalışmalar ışığında, şekil 4.5b'de gösterilen grafik vasıtasıyla; toprak yüzeyindeki sıcaklık dalgalanmalarının genliğini belirlemek mümkündür. Bu grafikler yardımıyla herhangi bir bölgede ki toprak sıcaklığının yıl içindeki maksimum ve minimum değerleri belirlemek mümkündür. Bulunan bu değerler; yazın ısı kuyusu, kışın ısı kaynağı olarak kullanılacak olan toprağın ısı pompası tasarımı açısından en olumsuz olduğu koşulları gösterir (L. Miles (1994)).



Şekil 4.6 Pratik toprak sıcaklıkları dağılımları.

Dikkat edilirse şekil 4.6’da toprak sıcaklığının yıl içindeki maksimum olduğu değerler derinlikle değişmektedir. Derinlik arttıkça maksimum toprak sıcaklıklarına daha geç ulaşılmaktadır. Bu gecikme; yüzeyde meydana gelen sıcaklık dalgalanmalarının belirli bir hızda toprak içine yayılması sonucu oluşur. Toprak içindeki bu oluşum Ingersoll ve Plass (1955) tarafından “sıcaklık dalgasının geri kalması” olarak tanımlanmıştır. Sıcaklık dalgasının geri kalması denklem (4.40)’de $x \cdot \sqrt{\omega/2a}$ faz farkı ifadesi ile göz önüne alınmıştır.

Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı olarak değişimini ifade eden denklem (4.40)’de yer alan ω ifadesi açık olarak yazılırsa yani $\omega = \frac{2\pi}{P}$ dönüşümü yapılırsa;

$$T(x,t) = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{P} - x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}\right) \quad (4.41)$$

ifadesi elde edilir. Denklemden ısı yayılma katsayısı “ a ” cgs biriminde ifade ediliyorsa, asal birimler olan uzunluğun “cm”, kütlenin “gr”, ve zamanın da “s” biriminde kullanılması gerektiği unutulmamalıdır. Denklem 1.41’de yer alan kosinüslü ifadenin solundaki “ t/P ” terimini oluşturan zaman ve periyot terimlerinin birimleri aynı olup birbirlerini götürdüğüne göre denklemin daha kullanışlı olması için söz konusu ifadenin elemanlarının “gün” biriminde yazılması mümkündür. Herhangi bir karışıklığa sebep vermemek için birimi “gün” olan ifadeler değişik bir simge ile gösterilirse ifade aşağıdaki halini alır.

$$T(x,t) = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t^*}{P^*} - x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}\right) \quad (4.42)$$

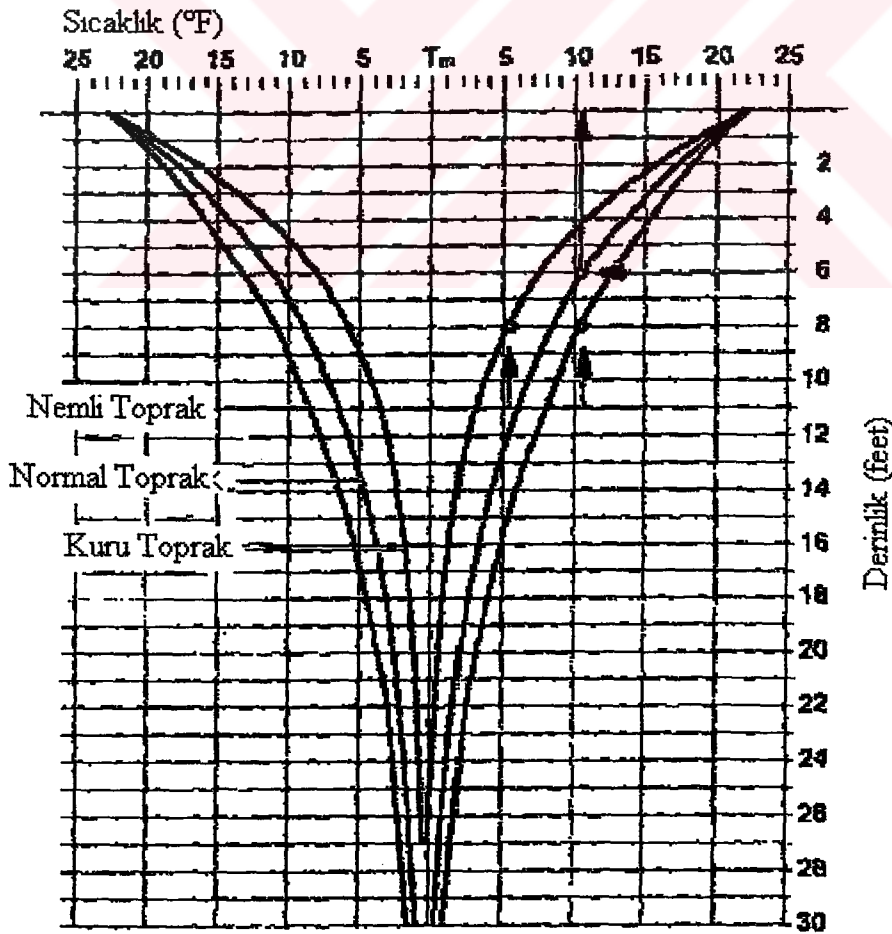
Denklem (4.42)’de “ t^* ” terimi gün biriminde zamanı temsil ederken, “ t ” terimi saniye biriminde zamanı temsil etmektedir. Aynı şekilde “ P^* ” terimi gün biriminde periyodu temsil ederken, “ P ” terimi de saniye biriminde periyodu temsil etmektedir.

Denklemden yer alan “ T_m ” toprağın yüzeydeki ortalama sıcaklığı ve “ T_o ” toprak yüzeyindeki sıcaklığın değişim miktarı, terimlerinin belirlenmesinde; uzun dönemde kaydedilen toprağın yüzey sıcaklıklarına göre hareket edilmelidir ve bu kaydedilen değerlerin ortalamasına göre yüzeydeki, maksimum ve minimum sıcaklıklar ve dolayısıyla sıcaklık değişim miktarı tespit edilmelidir. Sadece belirli bir yılın toprak sıcaklıklarına göre hareket edilirse, yüzeydeki sıcaklığın çok değişken değerler alması nedeniyle olumsuz sonuçlarla karşılaşılabilir. Çünkü;

mevsim normallerinin üstünde veya altında oluşan sıcaklıklar ilgili terimlerin doğru olarak tespit edilmesini engeller. Dolayısıyla mevsim normallerindeki toprak sıcaklıklarına ulaşmak için dönemde kaydedilen toprağın yüzey sıcaklıklarını esas almak gerekir.

Denklemlerde toprağın fiziksel özellikleri ısı yayılma katsayısı " α " terimi ile ele alınmıştır. Değişik toprak cinslerinin fiziksel özellikleri birbirinden farklı olduğuna göre; hesaplamanın yapıldığı yerin toprak cinsi deneysel olarak belirlenmelidir.

Ülkemizde söz konusu bilgiler Meteoroloji Genel Müdürlüğü' ünce yürütülen deneysel çalışmaların ışığında, ilgili bölge müdürlüklerinden elde edilebilir. Fakat Meteoroloji Genel Müdürlüğü sadece toprağın cinsini belirlemektedir ve toprağın fiziksel özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi vermemektedir. Dolayısıyla, sistemin kurulacağı yerden alınacak toprak numunelerinin, deneysel metotlarla fiziksel özelliklerinin belirlenmesi daha hassas sonuçlar verecektir.



Şekil 4.7 Toprak cinsi ve derinliğe bağlı sıcaklıklar dağılımları.

L. Miles (1994) şekil 4.7 vasıtasıyla değişik üç toprak cinsi için sıcaklıkları dağılımlarını göstermiştir. Denklem (4.40)' de toprak cinsinin sıcaklık dağılımına etkisi "a" ısı yayılma katsayısı ile göz önüne alınmıştır. Değişik toprak cinslerini için değişik birimlerde ısı yayılma katsayıları değişik birimlerde çizelge 4.1 ve çizelge 4.2'de gösterilmiştir

Çizelge 4.1 Değişik toprak tiplerinin cgs biriminde fiziksel özellikleri (Plass,1955)).

Malzeme	cgs			
	$k \times 10^3$	c	ρ	$a \times 10^3$
Toprak;				
%43 sulu kalkerli toprak	1,7	0,53	1,67	1,9
Kuartzlı, orta derecede iyi, kuru kum	0,63	0,19	1,65	2,0
Kuartzlı kum (%8,3 nemli)	1,4	0,24	1,75	3,3
%15 nemli kumlu kil	2,2	0,33	1,78	3,7
Kuru toprak	0,4-0,8	-	-	2-3
Nemli toprak	3-8	-	-	4-10
Çamur	2	0,6	1,5	2,2

Çizelge 4.2 Değişik toprak tiplerinin fph biriminde fiziksel özellikleri (Plass, 1955).

Malzeme	fph			
	k	c	ρ	a
Toprak;				
%43 sulu kalkerli toprak	0,41	0,53	104	0,007
Kuartzlı, orta derecede iyi, kuru kum	0,15	0,19	103	0,008
Kuartzlı kum (%8,3 nemli)	0,34	0,24	109	0,013
%15 nemli kumlu kil	0,53	0,33	111	0,014
Kuru toprak	0,1-0,2	-	-	0,008-0,012
Nemli toprak	0,8-2,0	-	-	0,02-0,04
Çamur	0,5	0,6	94	0,009

Toprağın ısı davranışını etkileyen en önemli üç özellik; yoğunluk, nem oranı ve toprak taneciklerini oluşturan materyallerdir. Belirli bir yoğunluk için nem miktarının artışı, ısı direnci yüksek olan havanın yerini suyun alması nedeniyle, toprağın ısı direncinin düşmesine neden olur. Toprağın ısı iletim katsayısı, toprağın doğal yerinde veya laboratuarlarda çeşitli ölçme aletleri yardımıyla veya toprağın ölçülen kuru yoğunluk ve nem oranına bağlı olarak belirli miktarda sapma göz önüne alınarak (± 25) Kersten denklemleri kullanılarak analitik yöntemlerle bulunabilir (Ataman,1985).

5. TOPRAK SICAKLIĞI SALINIMININ HESAPLANMASI

Bir önceki bölümde bir boyutlu periyodik ısı transferi incelenerek, toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı olarak değişimi, aşağıda da yer alan denklem (4.42) vasıtasıyla matematiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştı. Bu bölümde ise; bu denklem vasıtasıyla, toprağın sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişimini belirlemeye çalışacağız.

$$T(x,t) = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t^*}{P^*} - x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}\right) \quad (4.42)$$

T_m	: Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığı	(°C)
T_o	: Yüzeydeki toprak sıcaklığının genliği,	(°C)
x	: Gömme derinliği,	(m)
t	: Periyot başlangıcından itibaren süre,	(sn)
t^*	: Periyot başlangıcından itibaren süre,,	(gün)
P	: Periyot	(sn)
P^*	: Periyot,	(gün)
a	: Toprağın ısı difüzitesi	(cgs)

Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişiminin hesaplanması için, belirlenmesi gereken üç önemli husus vardır. Bunlar; toprağın yüzeydeki ortalama sıcaklığı T_m , toprak yüzeyindeki sıcaklığın değişim miktarı T_o ve periyodun başlangıç ($t=0$ değeri) noktasının yılın hangi gününü ifade ettiğidir.

Dördüncü bölümde; denklem (4.42) ve çeşitli grafikler yardımıyla belirli bir periyot boyunca toprak sıcaklığındaki değişimin, derinliğin artması ile azaldığı ve sıcaklık dalgalanmalarının lineerleştiği gösterilmişti. Dolayısıyla, farklı gömme derinliklerinde, toprağın sıcaklık dalgalanmalarının birbirinden farklı genliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştı ve bu fiziksel oluşumun denklem (4.42)'de $T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}}$ çarpanı ile göz önüne alındığı belirtilmişti.

Trigonometrik fonksiyonların, -1 ile $+1$ değerleri arasında tanımlı olduğundan yola çıkarak, yüzeydeki toprak sıcaklığının maksimum olduğu zamana; denklem (4.42)'deki " t " değişkeninin sıfır olması ile ulaşılabilir. Dolayısıyla yüzeydeki toprak sıcaklığının maksimum olduğu gün, periyodik hareketin başlangıç ve aynı zamanda bitiş noktasını belirtmektedir.

Denklemden yer alan “ T_m ” toprağın yüzeydeki ortalama sıcaklığı ve “ T_o ” toprak yüzeyindeki sıcaklığın değişim miktarı terimlerinin belirlenmesinde ve yüzeydeki toprak sıcaklığının maksimum olduğu günün tespit edilmesinde; uzun dönemde kaydedilen toprağın yüzey sıcaklıklarına göre hareket edilmelidir. Böylece yüzeydeki sıcaklığın her yıl farklı değerler alması nedeniyle oluşacak olumsuz sonuçlar önlenerek, toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı değişimi geliştirilebilir. Çeşitli imkansızlıklar nedeniyle meteoroloji müdürlüğünden sadece, 1985 ve 1999 yılları için 5cm, 20cm, 50cm ve 100 cm toprak derinliklerinde yapılan ölçümlerin sonuçları temin edilebilmiştir. Hesaplamalar; SULAMA 2000 programının veri tabanından son on yıllık değerlerin aylık ortalaması esas alınarak ve söz konusu yıllarda meteoroloji müdürlüğü tarafından ölçülen 100cm derinlikte elde edilen değerleri ile desteklenerek yapılmıştır. T_m değeri bu aylık verilere göre belirlenmiş ve meteoroloji datalarına uygun olacak şekilde T_o değeri tarafımızdan atanmıştır. SULAMA 2000 programından elde edilen aylık veriler aşağıda gösterilmiştir.

Ay	Ort. Max. sıcaklık (°C)	Ort. Min. sıcaklık (°C)
Ocak	8,7	3,8
Şubat	9,1	3,1
Mart	11,3	4,7
Nisan	16,5	8,6
Mayıs	20,8	12,5
Haziran	25,9	17
Temmuz	28,2	19,6
Ağustos	28,6	19,9
Eylül	24,7	16
Ekim	19,8	12,7
Kasım	14,1	8,1
Aralık	10	5,2

Çizelge 5.1 SULAMA 2000 programından elde edilen aylık toprak yüzeyi sıcaklıkları.

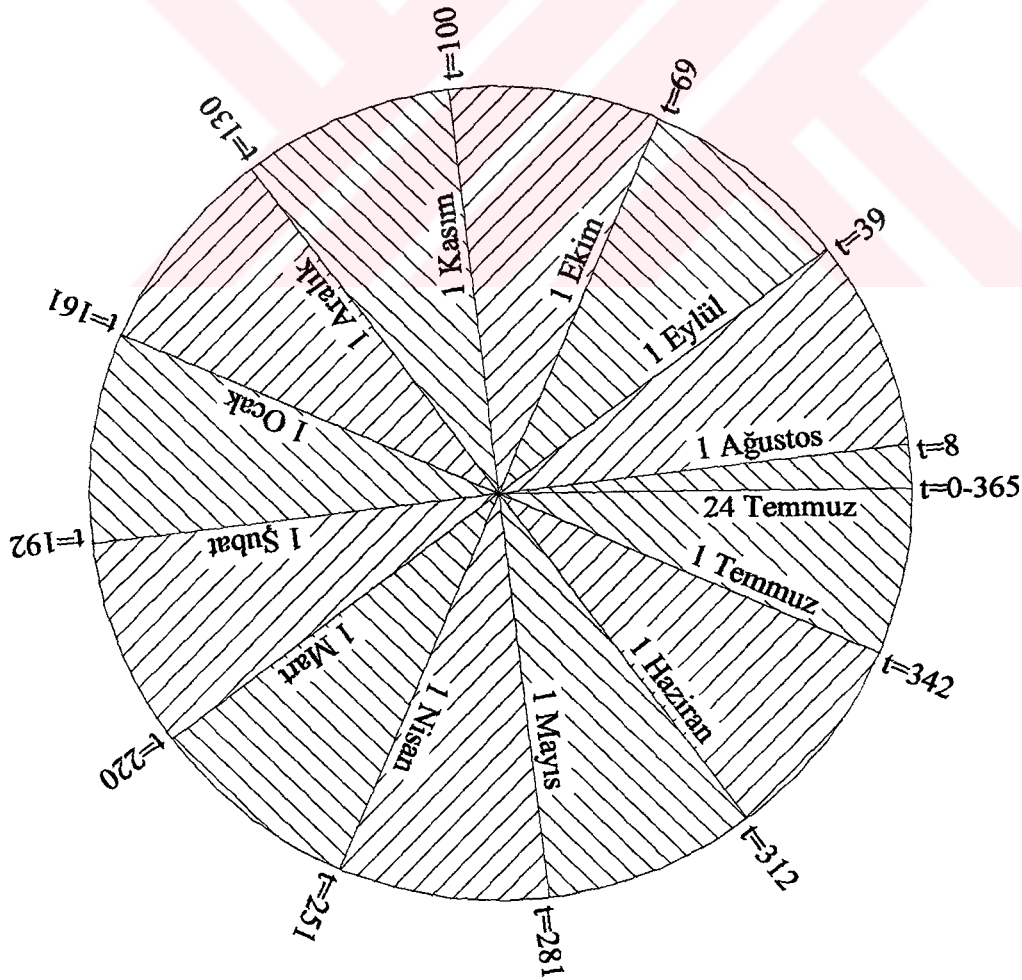
Yüzeydeki ortalama toprak sıcaklığının belirlenmesi için, yıl içinde kaydedilen maksimum ve minimum toprak sıcaklıklarının seçilmesi gerekir. Bu işlemde SULAMA 2000 programından elde edilen verilere göre hareket edilmiştir. Bunun sebebi ise; meteoroloji verilerinin kısa zaman aralıkları için elde edilebilmiş olmasıdır. Dolayısıyla, pik sıcaklıkların mevcudiyeti, yüzeydeki maksimum ve minimum toprak sıcaklıklarının seçilmesinde ve dolayısıyla tüm hesaplamadaki önemli bir hataya sebebiyet verir. Oysa programdan elde edilen veriler geniş zaman aralığında geçerlidir, dolayısıyla pik değerler daha dengeli bir yapıdadır.

T_m toprağın yüzeydeki ortalama sıcaklığı SULAMA 2000'den elde edilen verilere göre ;

$$T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{28,6 + 3,1}{2} = 15,85^\circ\text{C}$$

olarak bulunur. Yüzeydeki toprak sıcaklığının değişim miktarı; $T_o = 10,4^\circ\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. İstanbul Göztepe için toprağın ısıl yayılma katsayısı, nemli toprak için çizelge 4.1'e uygun olarak $a = 0,0068\text{cgs}$ alınmıştır.

Belirlenmesi gereken son önemli husus, periyodun başlangıcının yılın hangi gününe denk geldiğidir. Yüzeydeki toprak sıcaklıklarının değişim trendine göre temmuz ayının son haftasında; yüzeydeki zamana bağlı sıcaklık eğrilerinin tepe noktasına ulaştığı gözlenmiştir. Dolayısıyla periyodun başlangıç anı, 24 temmuz olarak belirlenmiştir. Yılın diğer günleri için t değerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

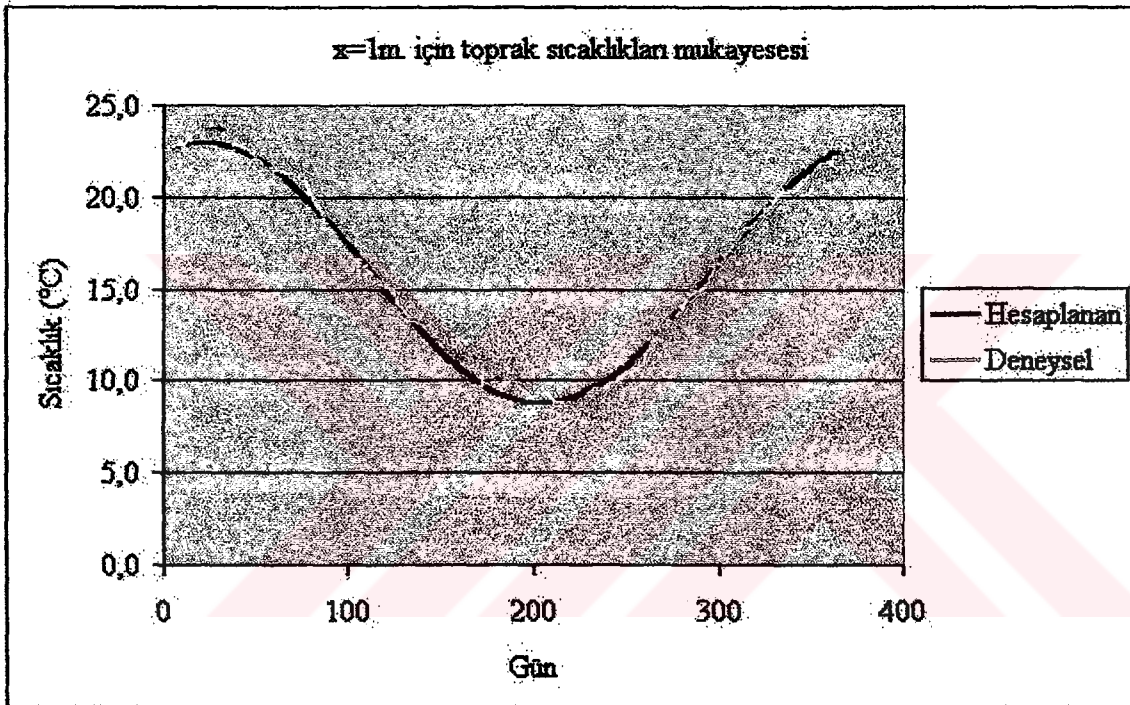


Şekil 5.1 Yılın günlerinin periyot içindeki konumları.

Yukarıdaki bilgiler ışığında 24 temmuz için 1m derinlikteki toprak sıcaklığı, denklem (4.42)'ye ilgili değerlerin konulması ile aşağıdaki gibi bulunur.

$$T = 15,85 + 10,4e^{-100\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{0}{365} - 100\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 22,4^{\circ}C$ olarak bulunur. 1m. derinlikte ve tüm günler için yapılan hesaplamaların sonucunda elde edilen toprak sıcaklıkları ile meteoroloji müdürlüğünden elde edilen deneysel verilerinin mukayesesi aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Deneysel verilerle hesaplanan değerlerin mukayesesi.

Mukayese sonucunda; hesaplanan değerlerdeki hata miktarının; $\pm 1^{\circ}C$ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca derinliğin artmasıyla, toprak sıcaklığındaki değişim miktarının azaldığı düşünülürse, bu hata miktarının daha derinlerdeki toprak sıcaklıkları için azalacağı sonucuna varılabilir. Buna karşılık toprak yüzeyi ile 1m arasındaki derinliklerde hesaplanan toprak sıcaklıklarında oluşacak hata miktarı $\pm 1^{\circ}C$ ' den daha fazla olacaktır. Bunun nedeni yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde, toprak sıcaklıklarının değişiminin çok daha düzensiz olmasıdır. Yer ısı değiştiricilerin 1m.'den daha derinliklere gömülmesi ise yüzeye yakın bölgelerdeki hataların büyük oluşunu önemsiz kılar. Dolayısıyla uyguladığımız yöntemin geçerli olduğu sonucuna varmak mümkündür. Değişik derinlikler için hesaplamalar yapılmış ve bulunan sonuçlar aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Değişik derinlikler için hesaplanan toprak sıcaklıkları, ekte gösterilmiştir.

Aşağıda her ayın ilk günü için değişik derinliklerdeki toprak sıcaklıkları hesaplamaları örnek olarak gösterilmiştir. Hesaplamalarda; yılın herhangi bir gününe ait “ t ” değerleri parantez içerisinde belirtilmiştir. Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişimi bir yıllık zaman aralığında incelenmiştir. İsteğe bağlı olarak hesaplamalar aylık olarak da yapılabilir.

01 Ocak ($t=161$) için 1m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-100\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{161}{365} - 100\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 10,7^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Şubat ($t=192$) için 1,5m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-150\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{192}{365} - 150\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 10,5^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Mart ($t=220$) için 2,0m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-200\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{220}{365} - 200\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 11,0^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Nisan ($t=251$) için 2,5m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-250\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{251}{365} - 250\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 11,9^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Mayıs ($t=281$) için 3,0m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-300\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{281}{365} - 300\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 13,0^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Haziran ($t=312$) için 3,5m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-350\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{312}{365} - 350\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 14,1^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Temmuz ($t=342$) için 4,0m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-400\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{342}{365} - 400\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 15,1^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Ağustos ($t=8$) için 1m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-100\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{8}{365} - 100\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 22,7^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Eylül ($t=39$) için 1,5m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-150\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{39}{365} - 150\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 21,7^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Ekim ($t=69$) için 2,0m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-200\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{69}{365} - 200\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 20,3^{\circ}C$ olarak bulunur.

01 Kasım ($t=100$) için 2,5m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-250\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{100}{365} - 250\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 18,7^{\circ}C$ olarak bulunur.

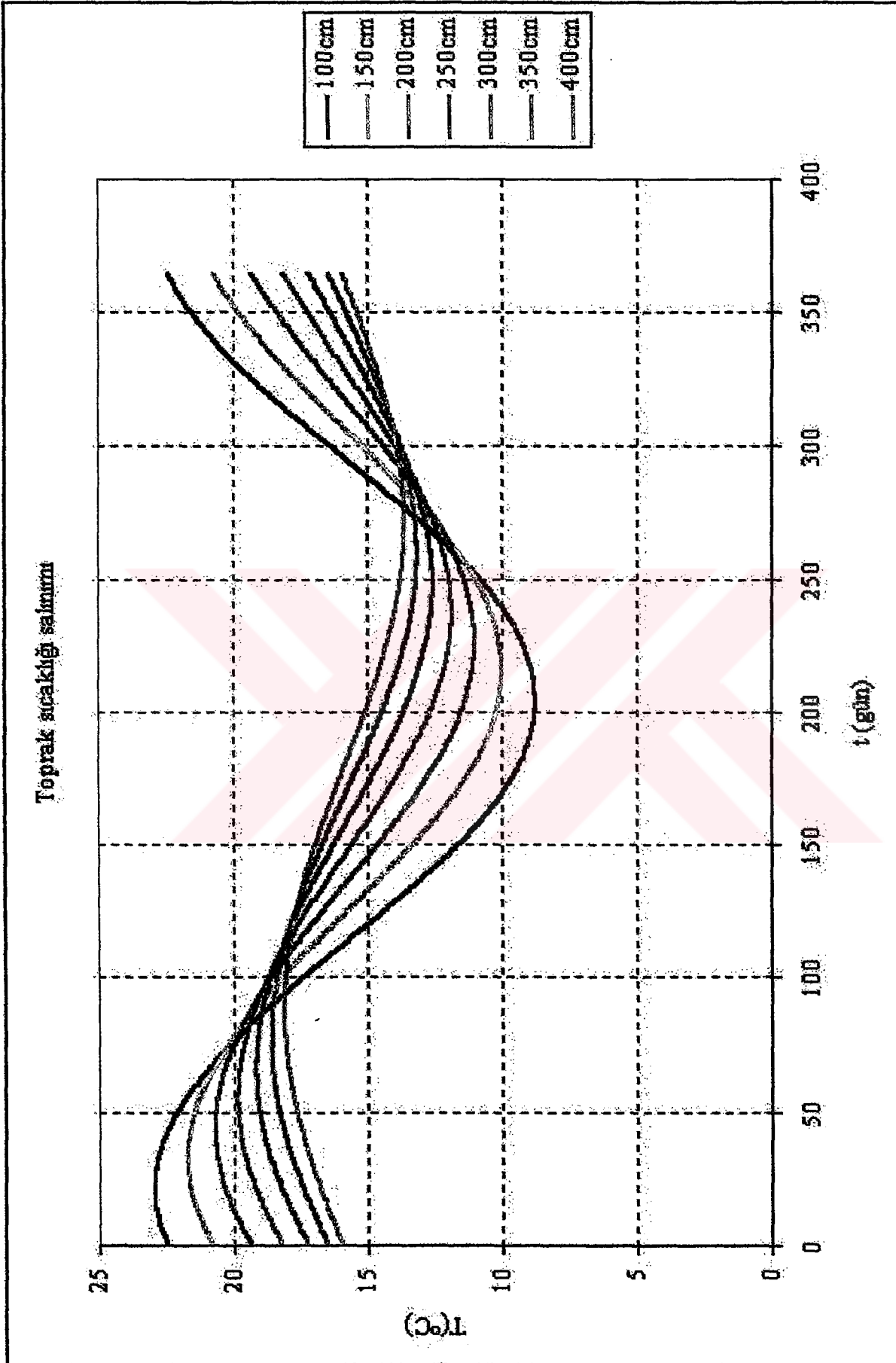
01 Aralık ($t=130$) için 3,0m derinlikteki toprak sıcaklığı,

$$T = 15,85 + 10,4e^{-300\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{130}{365} - 300\sqrt{\frac{\pi}{0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600}}\right)$$

$T = 17,4^{\circ}C$ olarak bulunur.

Hesaplamalar yılın her günü için, 100-400cm toprak derinliklerinde yapılmıştır. Elde edilen sıcaklık değerleri her ay için gösterilmiştir.

Hesaplanan bu değerler kullanılarak toprağın değişik derinliklerdeki, zamana bağlı sıcaklık dalgalanmaları şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı değişimi.

6.TOPRAKTAKİ ISI TRANSFERİ İLE İLGİLİ TEMEL KABULLER

Amerika ve Avrupa'nın değişik yerleşim bölgelerinde kurulmuş olan birçok toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasında, sistemin tasarımı; hazırlanan prototipler üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler esas alınarak yapılmaktadır. Bunun dışında, sistem tasarımı, daha karmaşık kabuller esas alınarak oluşturulan modellerin incelemesi ile de yapılmaktadır. Sürekli veya süreksiz rejimde oluşturulan birçok model, analitik veya nümerik yöntemlerle irdelenmiştir.

Bu bölümde analitik çözüm yöntemlerine ait bir takım bilgiler verilecek ve bu yöntemlerden bir tanesi esas alınarak topraktaki ısı transferi incelenecektir. Yer ısı değiştiricilerin analitik olarak tasarımı aşağıda yer alan iki farklı modelden biri esas alınarak yapılmaktadır.

6.1 Sabit Isı Akısı Kabulü

Bu kabul için en basit teori “çizgisel kaynak teorisi ”dir. Isı kaynağının çok uzun fakat çok küçük çaplı olması durumunda, ısı kaynağı “çizgisel kaynak” olarak kabul edilebilir. Buradan hareketle toprak altındaki borularda ısı geçişi bu yöntem ile incelenebilir. Buna göre aşağıdaki denklem kullanılarak, çizgisel kaynaktan “r” kadar uzakta bulunan bir bölgedeki sıcaklık değişimi; transfer olan ısı miktarı, zaman ve toprak özellikleri esas alınarak hesaplanabilir.

$$T - T_o = \frac{Q'}{2\pi \cdot k_t} \int_{\frac{r}{2\sqrt{a_t t}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (6.1)$$

Burada;

- a_t : Toprağın ısı difüzivite katsayısı
- t : Zaman
- k_t : Toprağın ısı iletkenlik değeri
- Q' : Birim boy için transfer olan ısı miktarı
- T : Etkilenmiş toprak sıcaklığı
- T_o : Etkilenmemiş toprak sıcaklığı
- β : İntegral değişkeni

olmaktadır.

Denklem (6.1)'de $x = r/(2\sqrt{a_t t})$ dönüşümü yapılarak, integralli ifade $I(x)$ olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla denklem (6.1), aşağıdaki haline dönüşür ve bu ifade “basit çizgisel kaynak denklemi” olarak adlandırılır.

$$I(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \rightarrow T - T_o = \frac{Q'}{2\pi \cdot k_t} I(x) \quad (6.2)$$

İntegralin değerleri x' e bağlı olarak aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 6.1 $I(x)$ integralinin değerleri.

x	I(x)	x	I(x)	x	I(x)	x	I(x)	x	I(x)
0,0001	8,9217	0,18	1,4423	0,53	0,4774	0,88	0,1627	1,55	0,01417
0,0002	8,2286	0,19	1,39	0,54	0,4634	0,89	0,1575	1,6	0,01151
0,0003	7,8231	0,2	1,3406	0,55	0,4498	0,9	0,1525	1,65	0,009315
0,0004	7,5354	0,21	1,2938	0,56	0,4365	0,91	0,1476	1,7	0,007508
0,0005	7,3123	0,22	1,2494	0,57	0,4237	0,92	0,1429	1,75	0,006027
0,0006	7,13	0,23	1,2072	0,58	0,4112	0,93	0,1383	1,8	0,004818
0,0007	6,9758	0,24	1,1669	0,59	0,399	0,94	0,1339	1,85	0,003837
0,0008	6,8423	0,25	1,1285	0,6	0,3872	0,95	0,1295	1,9	0,003042
0,0009	6,7245	0,26	1,0917	0,61	0,3758	0,96	0,1253	1,95	0,002403
0,001	6,6191	0,27	1,0565	0,62	0,3646	0,97	0,1212	2	0,00189
0,002	5,926	0,28	1,0228	0,63	0,3538	0,98	0,1173	2,05	0,00148
0,003	5,5205	0,29	0,9904	0,64	0,3433	0,99	0,1134	2,1	0,001154
0,004	5,2329	0,3	0,9594	0,65	0,3331	1	0,1097	2,15	0,0008963
0,005	5,0097	0,31	0,9295	0,66	0,3231	1,02	0,10255	2,2	0,000693
0,006	4,8274	0,32	0,9007	0,67	0,3134	1,04	0,09583	2,25	0,0005336
0,007	4,6733	0,33	0,8731	0,68	0,3041	1,06	0,0895	2,3	0,000409
0,008	4,5397	0,34	0,8464	0,69	0,2949	1,08	0,08355	2,35	0,0003122
0,009	4,422	0,35	0,8206	0,7	0,286	1,1	0,07796	2,4	0,0002373
0,01	4,3166	0,36	0,7958	0,71	0,2774	1,12	0,0727	2,45	0,0001795
0,02	3,6236	0,37	0,7718	0,72	0,269	1,14	0,06777	2,5	0,0001352
0,03	3,2184	0,38	0,7487	0,73	0,2609	1,16	0,06313	2,55	0,0001014
0,04	2,9311	0,39	0,7263	0,74	0,2529	1,18	0,05878	2,6	0,00007573
0,05	2,7084	0,4	0,7046	0,75	0,2452	1,2	0,0547	2,65	0,00005629
0,06	2,5266	0,41	0,6836	0,76	0,2377	1,22	0,05088	2,7	0,00004166
0,07	2,3731	0,42	0,6634	0,77	0,2305	1,24	0,0473	2,75	0,00003069
0,08	2,2403	0,43	0,6437	0,78	0,2231	1,26	0,04394	2,8	0,00002251
0,09	2,1234	0,44	0,6247	0,79	0,2165	1,28	0,04081	2,85	0,00001643
0,1	2,019	0,45	0,6062	0,8	0,2098	1,3	0,03787	2,9	0,00001194
0,11	1,9247	0,46	0,5884	0,81	0,2033	1,32	0,03512	2,95	0,000008641
0,12	1,8388	0,47	0,5711	0,82	0,197	1,34	0,03256	3	0,000006224
0,13	1,76	0,48	0,5543	0,83	0,1909	1,36	0,03016	3,05	0,000004462
0,14	1,6873	0,49	0,538	0,84	0,1849	1,38	0,02793	3,1	0,000003184
0,15	1,6197	0,5	0,5221	0,85	0,1791	1,4	0,02585		
0,16	1,5567	0,51	0,5068	0,86	0,1735	1,45	0,02123		
0,17	1,4977	0,52	0,4919	0,87	0,168	1,5	0,01738		

Sabit ısı akısı için toprak sıcaklığındaki değişim bu teori ile uygun bir şekilde hesaplanabilir. Normal topraklarda, özellikle 4"ten daha küçük ve bir günden daha uzun zaman aralıklarında basit çizgisel kaynak denklemi, pratik uygulamalar için yeterli doğrulukta sonuç verir. Bu hata verilen şartlarda %2'yi geçmez. Daha açık söylemek gerekirse, bahsedilen düşük hatalara ulaşmak için $a_t t / r^2 > 20$ kriteri sağlanmalıdır.

Çizgisel kaynak teorisinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

1. Toprak özellikleri üniform ve sabittir.
2. Hesap yapılan zaman aralığında birim boydaki ısı geçişi sabittir.
3. Isı kaynağı çizgisel bir kaynaktır, yani çok uzun ve ufak çaplıdır.

Çizgisel kaynak denklemi, zamanın çok kısa, boru çapının çok büyük olması durumunda önemli miktarda hatalara sebep olur. Buradan yola çıkarak Jaeger bütün durumları kapsayan fakat değerlendirmesi zor bir denklem ortaya atmıştır. Sabit Q' ısı akısında, ısı transfer eden bir boru için, başlangıçtaki etkilenmemiş toprak sıcaklığı ile borunun yakınındaki veya üzerinde göz önüne alınan herhangi bir noktanın etkilenmiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı ΔT aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta T = \frac{Q'}{k_t} \cdot G(z, p) = \frac{2\pi \cdot r \cdot w}{k_t} \cdot G(z, p) \quad (6.3)$$

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta) \cdot Y_1(\beta) - J_1(p\beta) \cdot Y_0(\beta)] \cdot \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (6.4)$$

Denklem (6.3) ve (6.4)'te $z = a_t t / r^2$ ve $p = R/r$ dir. Örneğin $p=5$ değeri ele alındığı zaman, borunun merkezinden $5r$ mesafesindeki sıcaklık anlaşılmalıdır. $p=1$ değeri borunun yüzeyini ifade eder. " r " borunun yarıçapıdır.

4" çaplı bir borunun merkezinden 20" mesafedeki toprak sıcaklığı çizgisel kaynak denklemi ile bulunabilir. Fakat bahsedilen mesafede Jaeger integrali ile çözümün bulunabilmesi için boru çapının 8" olması gerekir. Çünkü; Jaeger integrali $R > 10r$ olması durumunda güvenilir değildir. Dolayısıyla çizgisel kaynak metodu sayılarla fazla uğraşmadan kullanılabilecek tek basit çözümdür.

6.2 Sabit Yüzey Sıcaklığı Kabulü

Sabit yüzey sıcaklığı kabulüne ait teorik alt yapı Jaeger ve Carslaw 'un çalışmalarından elde edildi. Toprağın başlangıç sıcaklığından ΔT kadar düşük veya yüksek sıcaklıkta tutulan uzun bir boruda birim boyda transfer olan ısı miktarı Q' ve ısı akısı w , zamana bağlı olarak aşağıdaki ifadelerle bulunur (Ingersoll ve Plass, 1955).

$$Q' = k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) \quad (6.5)$$

$$w = \frac{k_t \cdot \Delta T \cdot F(z)}{2\pi \cdot r} \quad (6.6)$$

$$Q_z = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot k_t \cdot (T_{toprak} - T_{su}) \cdot F(z) \quad (6.7)$$

$$q = 3,15459 \cdot \frac{k_t \cdot \Delta T \cdot F(z)}{2\pi \cdot r} \quad (6.8)$$

$$z = a_t t / r^2 \rightarrow F(z) = \frac{8}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z\beta^2}}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} \cdot \frac{d\beta}{\beta} \quad (6.9)$$

Burada;

a_t	: Toprağın ısı difüzyon katsayısı	[fph]
t	: Zaman	[h]
k_t	: Toprağın ısı iletkenlik değeri	[fph]
ΔT	: Başlangıçtaki toprak sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark	[F]
Q'	: Birim boru boyu için transfer olan ısı miktarı	[BTU/(ft.h)]
Q_z	: Birim boru boyu için transfer olan ısı miktarı	[W/m]
w	: Birim yüzey alanı için transfer olan ısı miktarı	[BTU/(ft ² .h)]
q	: Birim yüzey alanı için transfer olan ısı miktarı	[W/m ²]
r	: Borunun yarıçapı	[ft]

olmaktadır.

Sabit yüzey sıcaklığı teorisinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

1. Toprak özellikleri üniform ve sabittir.
2. Hesap yapılan zaman aralığında birim boydaki ısı geçişi sabit değildir.
3. Borunun yüzey sıcaklığı sabit bir değerde tutulmaktadır.

Hesapların kolaylaştırılması amacıyla uzun integral işlemleri ile uğraşmak yerine z' ye bağlı olarak elde edilen $F(z)$ değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 6.2 $F(z)$ integralleri (Ingersoll ve Plass, 1955).

z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$
0,01	38,508	0,7	6,926	100	2,172
0,02	28,096	0,8	6,634	120	2,114
0,03	23,474	1	6,18	150	2,042
0,04	20,716	1,2	5,844	200	1,956
0,05	18,829	1,5	5,467	250	1,893
0,06	17,433	2	5,029	300	1,846
0,07	16,351	2,5	4,726	400	1,775
0,08	15,472	3	4,5	500	1,721
0,09	14,744	4	4,174	600	1,683
0,1	14,13	5	3,947	800	1,622
0,12	13,135	6	3,776	1000	1,578
0,14	12,361	8	3,529	1200	1,543
0,16	11,737	10	3,354	1500	1,502
0,18	11,217	12	3,224	2000	1,454
0,2	10,777	15	3,074	2500	1,418
0,25	9,916	20	2,898	3000	1,393
0,3	9,277	25	2,774	4000	1,35
0,35	8,779	30	2,678	5000	1,319
0,4	8,373	40	2,539	7500	1,266
0,45	8,037	50	2,44	10000	1,233
0,5	7,751	60	2,363	15000	1,184
0,6	7,288	80	2,251	25000	1,131

Tezimizde birim boyda transfer olan ısı akısının zamana bağlı olarak değişmesinin göz önüne alınması sebebiyle; sabit yüzey sıcaklığı kabulü tarafımızdan daha uygun bulunmuştur. Bundan sonraki hesaplamalar bu kabul üzerine oturtulmuş modele göre yapılmıştır. Bunun dışında borunun içerisindeki akışkanın özellikleri, boru cidarından merkezine doğru farklılıklar göstermediği ve tüm kesitte akışkanın ortalama özelliklerin hüküm sürdüğü kabul edilmiştir.

4" çapındaki bir borunun, yüksek ısı iletkenliğe sahip nemli ve killi A toprağına gömülmesi durumunda 24 saat süresince birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarını bulmaya çalışalım. Toprağın ilk sıcaklığının, ısı taşıyıcı akışkanın boruya giriş sıcaklığından 1F olduğunu varsayalım.

A toprağının ısı difüzivite katsayısı ve ısı iletim katsayıları sırasıyla çizelge 4.2'den; $a_t = 0,0261$ fph ve $k_t = 1,2$ fph olarak bulunur.

Borunun yarıçapı; $r = (d/2) \cdot (1/12) = (4/2) \cdot (1/12) = 0,167$ ft dir. Verilen değerler yerine konularak integrasyon sabiti $z = a_t t / r^2 = 0,0261 \cdot 24 / 0,167^2 = 22,5$ olarak bulunur.

İntegrasyon sabiti $z=22,5$ için $F(z)$ integralinin değeri çizelge 6.2'den $F(z)=2,83$ olarak bulunur. Birim boy boruya transfer olan ısı miktarı denklem (6.7)'ten faydalanarak;

$Q_z = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 2,83 = 3,27$ W/m olarak bulunur. Birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarı ise denklem (6.8)'e verilerin girilmesi ile;

$$q = 3,15459 \cdot \frac{k_t \cdot \Delta T \cdot F(z)}{2\pi \cdot r} = 3,15459 \cdot \frac{3,40}{2\pi \cdot 0,167} = 10,23 \text{ W/m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Bu defa 1" çapındaki bir borunun, düşük ısı iletkenliğe sahip nemli B toprağına gömülmesi durumunda 24 saat süresince birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarını bulmaya çalışalım. Toprağın ilk sıcaklığının, ısı taşıyıcı akışkanın boruya giriş sıcaklığından 1F olduğunu varsayalım.

B toprağının ısı difüzivite katsayısı ve ısı iletim katsayıları sırasıyla çizelge 3.2'den; $a_t = 0,0133$ fph ve $k_t = 0,4$ fph olarak bulunur.

Borunun yarıçapı; $r = (d/2) \cdot (1/12) = (1/2) \cdot (1/12) = 0,0417$ ft dir. Verilen değerler yerine konularak integrasyon sabiti $z = a_t t / r^2 = 0,0133 \cdot 24 / 0,0417^2 = 183,86$ olarak bulunur.

İntegrasyon sabiti $z=183,86$ için $F(z)$ integralinin değeri çizelge 6.2'den $F(z)=1,98$ olarak bulunur. Birim boy boruya transfer olan ısı miktarı denklem (6.7)'den faydalanarak;

$Q_z = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 1,98 = 0,76 \text{ W/m}$ olarak bulunur. Birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarı ise denklem (6.8)' e verilerin girilmesi ile;

$$q = 3,15459 \cdot \frac{k_t \cdot \Delta T \cdot F(z)}{2\pi \cdot r} = 3,15495 \cdot \frac{0,79}{2\pi \cdot 0,0417} = 9,55 \text{ W/m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Aşağıda geniş zaman aralıklarında yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, tablolar halinde verilmiştir. Zaman bağlı olarak değişik koşullarda bulunan ısı akıları bir grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 A toprağına gömülü 1" boru için hesaplanan değerler.

t	z	F(z)	Q	w _A	Q _z	q
24	360,81	1,81	2,17	8,28	2,09	26,13
120	1804,03	1,47	1,76	6,74	1,70	21,27
240	3608,06	1,36	1,64	6,26	1,57	19,73
480	7216,13	1,27	1,52	5,82	1,47	18,37
960	14432,26	1,19	1,43	5,45	1,37	17,19
1440	21648,38	1,15	1,37	5,25	1,32	16,56
1920	28864,51	1,12	1,34	5,12	1,29	16,14
2400	36080,64	1,09	1,31	5,01	1,26	15,82
2880	43296,77	1,08	1,29	4,93	1,24	15,56
3360	50512,90	1,06	1,27	4,86	1,22	15,35
3840	57729,02	1,05	1,26	4,81	1,21	15,16
4320	64945,15	1,04	1,25	4,76	1,20	15,00

Çizelge 6.4 B toprağına gömülü 1" boru için hesaplanan değerler.

t	z	F(z)	Q	w _A	Q _z	q
24	183,86	1,98	0,79	3,03	0,76	9,55
120	919,30	1,59	0,64	2,44	0,61	7,69
240	1838,59	1,47	0,59	2,24	0,56	7,07
480	3677,18	1,36	0,54	2,08	0,52	6,56
960	7354,37	1,27	0,51	1,94	0,49	6,11
1440	11031,55	1,22	0,49	1,87	0,47	5,89
1920	14708,74	1,19	0,47	1,81	0,46	5,72
2400	18385,92	1,16	0,46	1,78	0,45	5,60
2880	22063,10	1,14	0,46	1,75	0,44	5,51
3360	25740,29	1,13	0,45	1,72	0,43	5,43
3840	29417,47	1,11	0,45	1,70	0,43	5,37
4320	33094,66	1,10	0,44	1,68	0,42	5,31

Çizelge 6.5 A toprağına gömülü 4" boru için hesaplanan değerler.

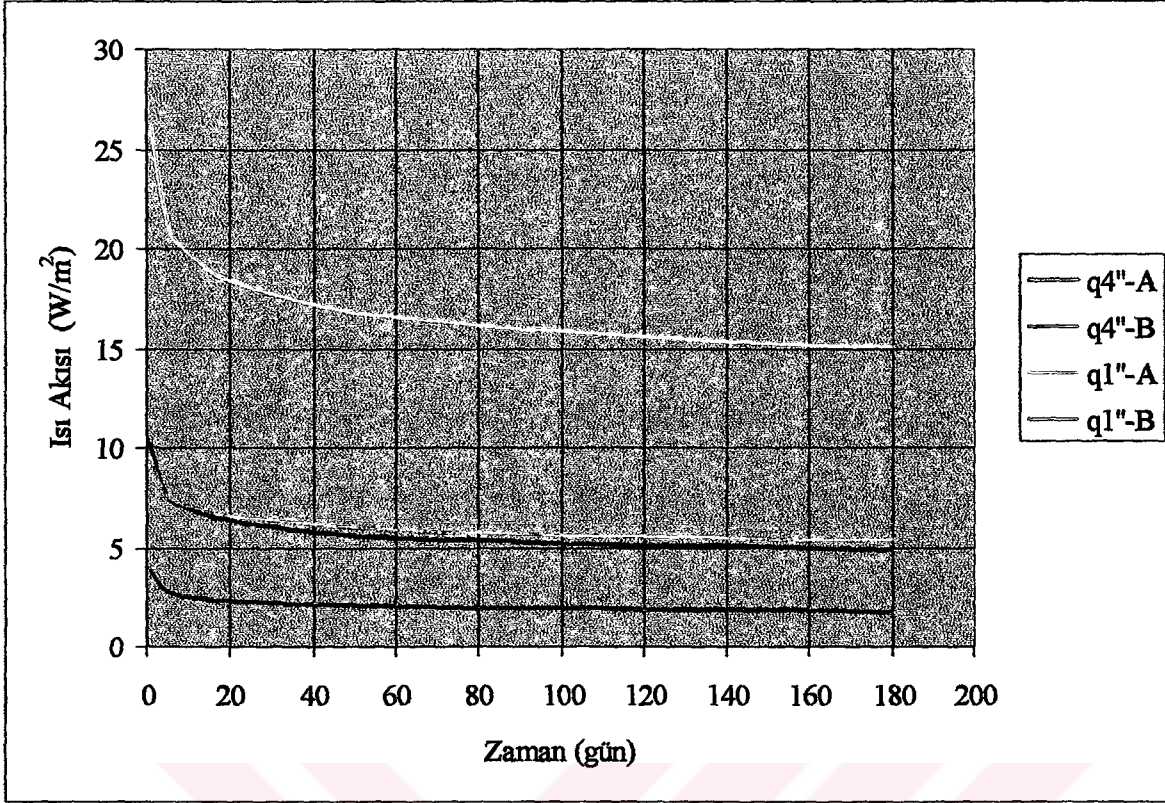
t	z	F(z)	Q	w _A	Q _z	q
24	22,55	2,83	3,40	3,24	3,27	10,23
120	112,75	2,13	2,56	2,44	2,46	7,71
240	225,50	1,92	2,31	2,20	2,22	6,95
480	451,01	1,75	2,10	2,00	2,02	6,31
960	902,02	1,60	1,92	1,83	1,84	5,78
1440	1353,02	1,52	1,83	1,74	1,75	5,50
1920	1804,03	1,47	1,76	1,69	1,70	5,32
2400	2255,04	1,43	1,72	1,64	1,65	5,18
2880	2706,05	1,41	1,69	1,61	1,62	5,08
3360	3157,06	1,38	1,66	1,59	1,60	5,00
3840	3608,06	1,36	1,64	1,56	1,57	4,93
4320	4059,07	1,35	1,62	1,54	1,55	4,87

Çizelge 6.6 B toprağına gömülü 4" boru için hesaplanan değerler.

t	z	F(z)	Q	w _A	Q _z	q
24	11,49	3,26	1,30	1,25	1,25	3,93
120	57,46	2,38	0,95	0,91	0,92	2,87
240	114,91	2,13	0,85	0,81	0,82	2,56
480	229,82	1,92	0,77	0,73	0,74	2,31
960	459,65	1,74	0,70	0,67	0,67	2,10
1440	689,47	1,65	0,66	0,63	0,64	1,99
1920	919,30	1,59	0,64	0,61	0,61	1,92
2400	1149,12	1,55	0,62	0,59	0,60	1,87
2880	1378,94	1,52	0,61	0,58	0,58	1,83
3360	1608,77	1,49	0,60	0,57	0,57	1,80
3840	1838,59	1,47	0,59	0,56	0,56	1,77
4320	2068,42	1,45	0,58	0,55	0,56	1,75

Aşağıdaki grafikte, birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarının zamana bağlı olarak değişimi iki farklı çap ve toprak çeşidi için gösterilmektedir.

Şekil 6.1'e bakarak geniş zaman aralıklarında boru çapındaki büyümenin, transfer olan ısı miktarının azalmasına neden olduğunu, yer ısı değiştiricisinin gömüleceği toprağın özelliğinin de transfer olan ısı miktarına etkisinin büyük olduğunu söyleyebiliriz. Buradan yola çıkarak, toprak özelliklerinin doğru tespit edilmesinin çok önemli olduğu vurgulanabilir. Denklemlere dikkat edecek olursak, yer ısı değiştiricisi malzemesinin bulunan sonuçlara herhangi bir etkisinin olmadığını görürüz. Bunun sebebi boru malzemesinin direncinin ihmal edilmesidir.



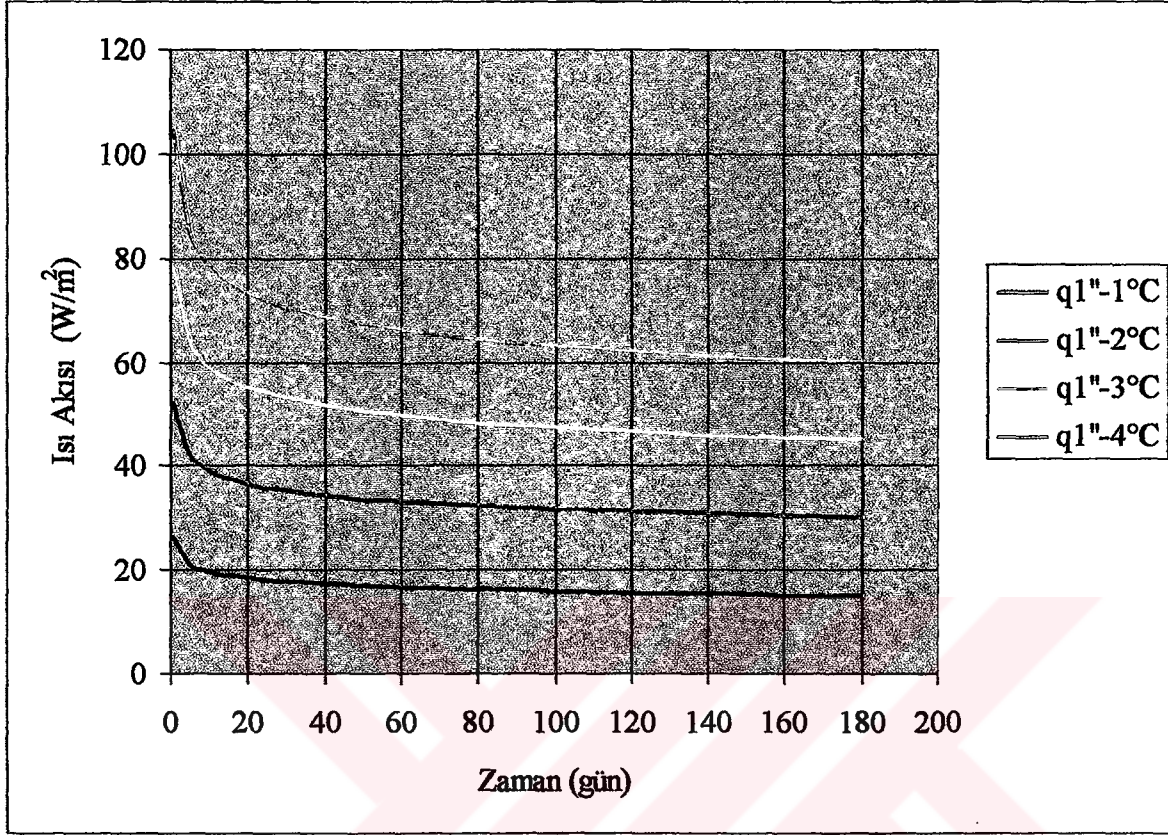
Şekil 6.1 Hesaplanan zamana bağlı ısı akısı değerlerinin mukayesesi.

Bu defa, 1" çaplı boruların yüksek ısı iletkenliğe sahip A toprağına gömüldüğünü düşünelim. Toprağın ısı transferi başlamadan önceki sıcaklığı ile boru girişindeki su sıcaklığı farkının değişken olduğunu farz ederek, birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarının bu farklılıktan nasıl etkilendiğini inceleyelim. Boru yüzeyi ile toprak arasındaki sıcaklık farkının $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ ve $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$ olduğu durumlarda hesaplanan değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 Değişik sıcaklık farklarında, 1" boru için hesaplanan değerler.

t_c	t	z	$F(z)$	$q_{1''-1^{\circ}\text{C}}$	$q_{1''-2^{\circ}\text{C}}$	$q_{1''-3^{\circ}\text{C}}$	$q_{1''-4^{\circ}\text{C}}$
1	24	360,81	1,81	26,13	52,27	78,40	104,54
5	120	1804,03	1,47	21,27	42,53	63,80	85,07
10	240	3608,06	1,36	19,73	39,47	59,20	78,93
20	480	7216,13	1,27	18,37	36,74	55,11	73,49
40	960	14432,26	1,19	17,19	34,38	51,56	68,75
60	1440	21648,38	1,15	16,56	33,12	49,67	66,23
80	1920	28864,51	1,12	16,14	32,27	48,41	64,55
100	2400	36080,64	1,09	15,82	31,63	47,45	63,27
120	2880	43296,77	1,08	15,56	31,12	46,68	62,24
140	3360	50512,90	1,06	15,35	30,69	46,04	61,39
160	3840	57729,02	1,05	15,16	30,33	45,49	60,65
180	4320	64945,15	1,04	15,00	30,01	45,01	60,02

Yukarıda hesaplanan değerler için; zaman bağılı olarak değişik koşullarda bulunan ısı akıları, aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Hesaplanan zamana bağlı ısı akısı değerlerinin mukayesesi.

Yukarıdaki grafiğe bakarak; toprak ile boru yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının artmasının birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarını arttırdığı söylenebilir.

Borunun direncini ihmal ettiğimize göre, zaten 1-1,5mm et kalınlığına haiz olan borunun sonsuz incelikte olduğunu, yani borunun içindeki ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığının borunun yüzey sıcaklığına eşit olduğunu düşünerek, modelimizi kurabiliriz. Yer ısı değiştiricisine giren ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı, bir dizayn parametresidir. Dolayısıyla tarafımızdan değiştirilebilir. Tüm bu anlatılanlardan yola çıkarak, yer ısı değiştiricisine giren ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığını, olabildiği kadar düşük tutmak gerektiği sonucuna varılabilir. Burada ki sınırlayıcı faktör ısı taşıyıcı akışkanın donma noktası olduğuna göre; donma noktasının biraz üzerindeki sıcaklıklardaki ısı taşıyıcı akışkan yer ısı değiştiricisine verilirse, söz konusu toprak ile boru yüzeyi (ısı taşıyıcı akışkan sıcaklığı) arasındaki sıcaklık farkı maksimum değerini alır. Buna bağlı olarak birim yüzey alanından transfer edilen ısı miktarı da maksimum olur.

Söz konusu sıcaklık farkını arttırmanın bir diğer yolu ise toprak sıcaklığını arttırmaktır. Isıtma sezonunda derinlik arttıkça toprak sıcaklığı artmaktadır. Dolayısıyla gömme derinliğini artırarak ısı taşıyıcı akışkanla, toprak arasındaki sıcaklık farkı arttırılabilir. Fakat gömme derinliğinin arttırılması, sistemin yatırım maliyetini arttırmaktadır. Dolayısıyla gömme derinliğinin tespitinde mutlaka bir optimizasyon çalışması yapılmalıdır.

Şekil 6.1 ve 6.2’den elde ettiğimiz bir başka sonuçta; zamanla birim yüzeyden transfer olan ısı miktarının azalmasıdır. Buradan yola çıkarak, iki günlük zaman periyodunda, birinci gün sonunda transfer olan ısı miktarının, ikinci gün sonunda transfer olan ısı miktarından farklı değerler alacağı söylenebilir. Toprağın direncinin, zamana bağlı olarak artması sebebiyle; ısı transferinin başladığı andan itibaren, eşit zaman aralıklarında, transfer olan ısı miktarları birbirlerinden farklı değerler alırlar. Tüm soğutma sezonu boyunca ısı pompası, gerekli olan soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için belirli bir süre çalışır. Sabit yüzey sıcaklığı kabulüne göre yapılan hesaplamalarda, belirli bir zaman aralığı dahilinde, herhangi bir “ t ” anında transfer olan ısı miktarının, bir sonraki “ $t+dt$ ” anında transfer olan ısı miktarına etkisi göz önüne alınmaktadır. Dolayısıyla bu kabule bağlı olarak dizayn edilen her hangi bir sistemin, toplam çalışma süresinin sonunda, gerekli olan ısı ihtiyaçları karşılayacak şekilde, tasarlanması gerekmektedir.

A toprağına 1” lik bir boru sisteminin gömüldüğünü varsayalım. Boru sistemi bir ısı değiştiricisine bağlandığını ve bir pompa vasıtasıyla sistemin içerisinde ısı taşıyıcı akışkan olarak su dolaştırıldığını kabul edelim. Boru içerisindeki suyun akış hızı 0,5m/s olsun. Boru ağının toprak içerisinde kapalı bir döngü yaptığı ve sıcaklığı artan suyun, döngünün sonunda bir ısı değiştiricisinde topraktan kazandığı ısıyı başka bir ortama vererek ilk haline getirildiğini düşünelim. Sistemin 5 gün çalışarak, topraktan 5kW ısı çekilmesi istensin. Suyun boruya giriş sıcaklığı 1°C ,toprağın sıcaklığı ise 10°C olsun. Bu sistemin ihtiyaç duyduğu boru uzunluğunu bulmaya çalışalım.

Boru sistemini sonsuz incelikte, sonsuz sayıda parçaya bölelim ve sistemin içindeki bir su tanesinin hal değişimini inceleyelim. Boru sistemine giren su tanesinin sıcaklığı ile toprak sıcaklığı arasındaki 9°C’lik fark sebebiyle topraktan, su tanesine belirli miktarda ısı geçişi olur. Bu ısı geçişi nedeniyle su tanesinin sıcaklığı artar. Boru sisteminin ikinci parçasına su artık 1°C’nin üzerinde bir sıcaklıkla girer ve su ile toprak arasında artık 9°C’nin altında bir sıcaklık farkı vardır. Dolayısıyla topraktan transfer olan ısı miktarı borunun başlangıcından daha az olacaktır. Bu sebepten ötürü, ikinci parçayı terk eden su tanesinin sıcaklığındaki artış

birinci parçadaki sıcaklık artışından daha az olacaktır. Su tanesi bu şekilde, son parçaya kadar sıcaklığını arttıracak, fakat boru boyunca toprak ile arasındaki sıcaklık farkı azalacağından su tanesinin başlangıçtaki sıcaklık artışını elde edebilmesi için birden çok parçadan geçmesi gerekecektir.

Düşük sıcaklıklarda suyun yoğunluğu $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 'tür. 1 inch'lik borunun iç çapı ise 1,075 inch olduğuna göre boru sistemindeki suyun kütleli debisi,

$$m = \rho \cdot A \cdot u = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot u = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot (1,075 \times 0,0254)^2}{4} \cdot 0,5 = 0,293 \text{ kg/s olarak bulunur.}$$

2°C'lik ortalama sıcaklık için suyun özgül ısınma ısısı, suyun termofiziksel özellikleri tablosundan $C_p = 4,211 \text{ kJ/kg}$ olarak okunur. Buradan suyun boru sisteminden çıkması gereken su sıcaklığı;

$$T_f = T_g + \frac{Q}{m \cdot C_p} = 1 + \frac{5}{0,293 \cdot 4,211} \cong 5^\circ\text{C olarak bulunur.}$$

Borunun yarıçapı; $r = (d/2) \cdot (1/12) = (1/2) \cdot (1/12) = 0,0417 \text{ ft}$ dir. A toprağının değerleri yerine konulursa integrasyon sabiti $z = a_t t / r^2 = 0,0261 \cdot 5 \cdot 24 / 0,0417^2 = 1561,09$ olarak bulunur.

İntegrasyon sabiti $z = 1561,09$ için $F(z)$ integralinin değeri çizelge 6.2'den $F(z) = 1,49$ olarak bulunur. Boru başlangıç ve sonunda, birim boy boruya transfer olan ısı miktarı denklem (6.7)'den faydalanarak;

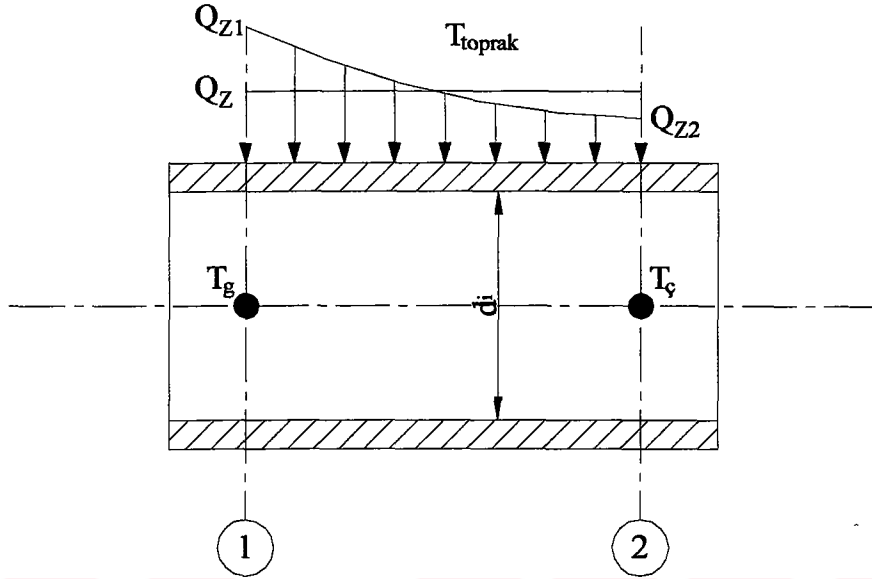
$$Q_{z1} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (10 - 1) \times 1,8 \cdot 1,98 = 27,94 \text{ W/m,}$$

$$Q_{z2} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (10 - 5) \times 1,8 \cdot 1,98 = 15,52 \text{ W/m olarak bulunur.}$$

Gerekli olan boru boyu L;

$$L = \frac{Q}{(Q_{z1} + Q_{z2})/2} = \frac{5000}{(27,94 + 15,52)/2} = 226,91 \text{ m olmalıdır.}$$

Dikkat edilirse yukarıdaki boru sisteminde, suyun tek bir akış yönü bulunmaktadır. Şimdi de sürekli rejimde boru içindeki sıcaklık değişimini inceleyelim.



Şekil 6.3 Boru boyunca meydana gelen ısı transferi.

Boru içindeki suyun sıcaklık değişimi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$T_b = T_ç - T_g = \frac{1000 \times Q_z}{m \cdot C_p} \cdot l \Rightarrow dT_b = \frac{1000 \times Q_z}{m \cdot C_p} \cdot dl \quad (6.10)$$

Isı transferine sebebiyet veren sıcaklık farkı $T = T_{toprak} - T_{su}$ dur. Dış ortam sıcaklığı sabit olduğundan, su sıcaklığı 1° arttığında, dış ortam ile su arasındaki sıcaklık farkı 1° azalır. Dolayısıyla bu durum; $dT = -dT_b$ olarak ifade edilebilir. Denklem (6.7) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_z = 0,961519 \cdot k_t \cdot (T_{toprak} - T_{su}) \cdot F(z) = 0,961519 \cdot k_t \cdot T \cdot F(z) \quad (6.11)$$

Denklem (6.11) ifadesi denklem (6.10)'da yerine konulursa;

$$dT_b = \frac{961,519 \cdot k_t \cdot T \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot dl = -dT \quad (6.12)$$

Sıcaklık ifadelerini bir arada yazalım,

$$-\frac{dT}{T} = \frac{961,519 \cdot k_t \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot dl \quad (6.13)$$

Sistemin sınır koşulları, $l=0$ için $T_1 = T_{toprak} - T_g$, $l=L$ için $T_2 = T_{toprak} - T_\phi$ olarak belirtilir, ve (6.13) denkleminin integrali alınırsa,

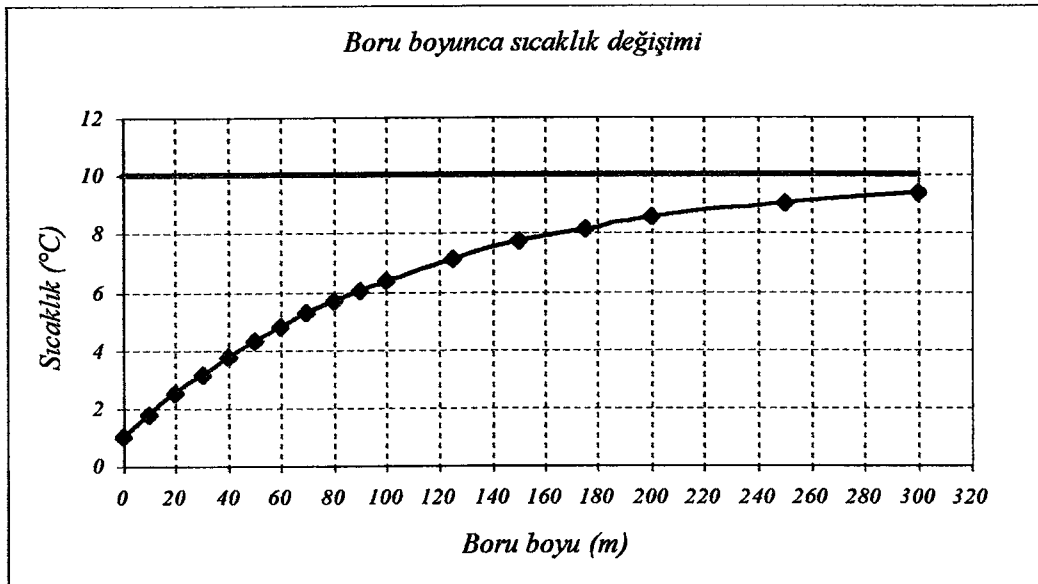
$$\int_{T_1}^{T_2} -\frac{dT}{T} = \frac{961,519 \cdot k_t \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot \int_0^L dl \quad (6.14)$$

$$\ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{961,519 \cdot k_t \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot L \quad (6.15)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\frac{961,519 \cdot k_t \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot L} \quad (6.16)$$

$$T_\phi = T_{toprak} - (T_g - T_{toprak}) \cdot e^{\frac{961,519 \cdot k_t \cdot F(z)}{m \cdot C_p} \cdot L} \quad (6.17)$$

Boru boyunca sıcaklık değişimi elde edilmiş olur. Denklem (6.17)'deki fonksiyonun grafiği şekil 6.4'te ki gibidir.



Şekil 6.4 Boru boyunca sıcaklık değişimi.

Şekil 6.4'ten de görüldüğü gibi, su sıcaklığını 1°C' den 2°C' ye gelmesi için gerekli olan boru uzunluğu, su sıcaklığını 4°C' den 5°C' ye getirmek için gerekli olan boru uzunluğundan daha azdır. Dolayısıyla giriş-çıkış su sıcaklıkları farkı arttıkça sistem verimsiz bir hale gelmektedir. Buradan yola çıkarak, seri akışlı sistem yerine boru düzeni paralel akışlı sistem olarak tasarlanabilir. Birden fazla boru paralel döşenerek, her bir boruda su sıcaklığının 1°C' den 2°C' ye gelmesi sağlanarak sistem daha verimli kullanılabilir. Gerekli olan su debisi;

$$m_{toplam} = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} \quad (6.18)$$

$$m_{toplam} = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{5}{4,211 \cdot 1} = 1,19 \text{ kg/s' dir.}$$

Bir borudan geçen suyun kütleli debisi yukarıda 0,293kg/s olarak bulunmuştur. Dolayısıyla 1°C sıcaklık artışı için gerekli olan boru sayısı(modül sayısı); $n_{boru} = m_{toplam} / m = 1,19 / 0,293 = 4$ adet olarak bulunur. Boru başlangıç ve sonunda, birim boy boruya transfer olan ısı miktarı denklem (6.7)'den faydalanarak;

$$Q_{z1} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (10 - 1) \times 1,8 \cdot 1,98 = 27,94 \text{ W/m,}$$

$$Q_{z2} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (10 - 2) \times 1,8 \cdot 1,98 = 24,84 \text{ W/m}$$

olarak bulunur. 1 modül için gerekli olan boru boyu L;

$$L = \frac{Q}{(Q_{z1} + Q_{z2})/2} = \frac{5000}{(27,94 + 24,84)/2} = 46,72 \text{ m olmalıdır.}$$

Toplam boru boyu ise (4 modül için);

$$\sum L = n_{boru} \cdot L = 4 \times 46,72 = 186,87 \text{ m olarak bulunur.}$$

Görüldüğü gibi paralel akışlı sistem tek borulu seri akışlı sistemden daha az boru gerektirmektedir. Buradan hareketle tezimizde yer ısı değiştiricileri; paralel akışlı olarak dizayn edilecektir.

7. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASININ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Toprak kaynaklı ısı pompası tesisinin; temelde 3 ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Bunlar; ısı taşıyıcı akışkan ile jeokütlenin temasını sağlayarak, ısı alışverişine imkan sağlayan boru düzenleri yani, yer ısı değiştiricileri, jeokütleden elde edilen ısıyı binaya aktaran sistem, yani ısı pompası, bina içindeki mahalleri ısıtmak veya soğutmak için gerekli olan ısıdan yararlanma tesisi yani, ısı dağıtım tesisidir.

Isıtma sezonunda ısı; yer ısı değiştiricisi içerisinde dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkan vasıtasıyla topraktan çekilir. Sıcaklığı artan ısı taşıyıcı akışkan, topraktan aldığı ısıyı, buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktararak, soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlar. Buharlaştırılan soğutucu akışkan, kompresörde sıkıştırılarak, sıcaklık ve basıncının artırılması sağlanır. Buna bağlı olarak enerjisi de artan soğutucu akışkan, enerjisini yoğunlaştırıcuda ısı dağıtım sisteminde yer alan ısı taşıyıcı akışkanına aktarır. Böylece topraktan çekilen ısı, yaşam alanına iletilmiş olur.

Soğutma sezonunda ise ısı; ısı dağıtım sisteminde yer alan ısı taşıyıcı akışkan vasıtasıyla, yaşam alanından çekilir. Sıcaklığı artan ısı taşıyıcı akışkan; yaşam alanından çektiği ısıyı, buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktararak, soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlar. Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırıldıktan sonra, kondenserde yoğunlaşırken, ısını yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkana aktarır. Yer ısı değiştiricisi içindeki ısı taşıyıcı akışkan, toprak sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip olduğundan, kazandığı ısıyı toprağa iletir.

Isı pompasının çalıştığı basınç aralıklarının ve dolayısıyla ısı pompasının karakteristik değerlerinin belirlenmesinde, yer ısı değiştiricisi içerisinde dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı ile ısı dağıtım sisteminde kullanılan ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklıkları esas alınır. Binanın ısı kaybı veya kazancına göre bahsedilen sıcaklıklara uygun olacak şekilde ısı pompası çevriminde kullanılacak olan soğutucu akışkanın kütleli debisi ve ısı pompası çevriminin tüm elemanlarının kapasiteleri belirlenmiş olur.

7.1 Isı Dağıtım Sisteminin Belirlenmesi

Isı dağıtım sisteminin seçilmesi için, öncelikle toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, kullanım amacının belirlenmesi gerekir. Tezimizde söz konusu sistem hem ısıtma, hem de soğutma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla kurulmuştur.

Hem ısıtma hem de soğutma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla kullanılan ısı pompasının, yaşam mahaline ısıyı aktarırken kullandığı ısı taşıyıcı akışkana göre havalı veya sulu dağıtım sistemleri tercih edilebilir. Havalı sistemlerde, sıcak veya soğuk havayı dağıtmak için hava kanalları kullanılır. Sulu sistemlerde ise sıcak veya soğuk suyu dağıtmak için fan-coil sistemi kullanılır.

Tezimizde sulu dağıtım sistemleri tercih edilmiş, yaşam alanına ısının aktarımı veya yaşam alanından ısının uzaklaştırılmasının, fan-coil sistemi ile sağlanması öngörülmüştür. Fan-coil sisteminin soğutma sezonunda 7/12°C, ısıtma sezonunda 45/25°C sıcaklık aralıklarında çalışması tasarlanmıştır.

7.2 Yer Isı değiştiricisinde Dolaştırılan Isı Taşıyıcı Akışkan Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Yer ısı değiştiricisinde dolaştırılacak akışkanın sıcaklıkları en olumsuz koşullarda ki toprak sıcaklıklarına göre belirlenir. Isıtma sezonunda, toprak ısı kaynağı olarak kullanılacağından, ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı; toprak sıcaklığının minimum olduğu değerden daha küçük olması gerekir. Soğutma sezonunda ise toprak ısı kuyusu olarak kullanılacağından, ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı; toprak sıcaklığının maksimum olduğu değerden daha büyük olması gerekir.

Toprak sıcaklığının zamana ve derinliğe bağlı olarak değişimi 4. bölümde incelenmiş ve aşağıdaki denklem elde edilmişti.

$$T(x,t) = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{P} - x\sqrt{\frac{\pi}{aP}}\right) \quad (4.41)$$

Herhangi bir derinlikte tüm zaman aralığı boyunca sıcaklık değişiminin, denklem (4.41)' deki $\cos(\omega \cdot t - x\sqrt{\pi/aP})$ terim ile ifade edildiği ve söz konusu terimin -1 olduğu anda toprak sıcaklığı minimum, +1 sonucunu verdiği anda toprak sıcaklığı maksimum değerini aldığı belirtilmişti. Dolayısıyla herhangi bir derinlikte, tüm zaman aralığı boyunca elde edilebilecek maksimum ve minimum toprak sıcaklıkları aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$T_{mak} = T_m + T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \quad (7.1)$$

$$T_{\min} = T_m - T_o e^{-x\sqrt{\pi/aP}} \quad (7.2)$$

Denklem (7.1) ve (7.2)'ye İstanbul Göztepe için elde edilen değerler konularak; çeşitli derinlikler için maksimum ve minimum sıcaklıklar hesaplanmış ve aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. 100cm toprak derinliği için maksimum ve minimum toprak sıcaklıklarının hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$T_{\max} = 15,85 + 10,4e^{-100\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} = 22,94^\circ\text{C}$$

$$T_{\min} = 15,85 - 10,4e^{-100\sqrt{\pi/(0,0068 \times 365 \times 24 \times 3600)}} = 8,76^\circ\text{C}$$

Çizelge 7.1 Çeşitli derinliklerde maksimum ve minimum toprak sıcaklıkları

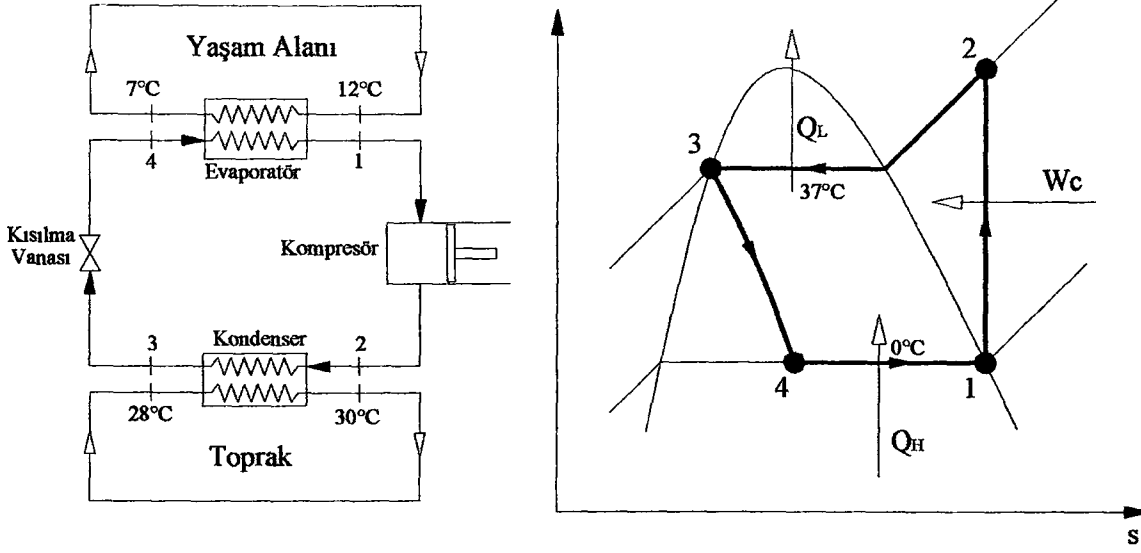
x(cm)	100	130	150	180	200	225	250
T _{max} (°C)	22,94	22,17	21,71	21,07	20,69	20,25	19,84
T _{min} (°C)	8,76	9,53	9,99	10,63	11,01	11,45	11,86

Çizelge 7.1'den faydalanarak, yer ısı değiştiricisine ısı taşıyıcı akışkanın giriş sıcaklığı; ısıtma mevsiminde 1°C, soğutma sezonunda ise 30°C olarak seçilmiştir.

7.3 Isı Pompasının Dizaynı

Soğutma sezonunda yer ısı değiştiricisinde dolaştırılan suyun sıcaklığı 30°C 'dir. Dolayısıyla ısı pompasının kondensasyon sıcaklığı 30°C 'nin üzerinde olmalıdır. Buna karşılık ısı dağıtım sisteminde kullanılan ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığı 7°C'dir. Dolayısıyla ısı pompasının evaporasyon sıcaklığının 7°C 'nin altında olması gerekir.

Tezimizde evaporasyon ve kondensasyon sıcaklıkları, ısı taşıyıcı akışkan ile soğutucu akışkan arasında 7°C sıcaklık farkı olacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre, ısı pompasının kondensasyon sıcaklığı 37°C, evaporasyon sıcaklığı ise 0°C olarak belirlenebilir. Buradan yola çıkarak ısı pompası çevriminde soğutucu akışkanın T-s diyagramında; 1, 2, 3 ve 4 hallerindeki entalpileri belirlenebilir. Aşağıdaki şekilde, sistemin prensip şeması ve T-s grafiği gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Sistemin prensip şeması ve ısı pompası çevriminin T-s diyagramı.

Isı pompası çevriminde soğutucu akışkan olarak freon 12 kullanılmıştır. 0°C ' de freon 12'nin doyma basıncı $P_1=308,6 \text{ kPa}$ ' dır. $T_1=0^{\circ}\text{C}$ ve $x=1$ için $h_1=187,397 \text{ kJ/kg}$ ve $s_1=0,696 \text{ kJ/kgK}$ olarak termodinamik tablolardan okunur.

37°C 'de freon 12'nin doyma basıncı $P_2=891,47 \text{ kPa}$ ' dır. Termodinamik tablolardan; $T_3=37^{\circ}\text{C}$ ve $x=0$ için $h_3=203,987 \text{ kJ/kg}$ olarak bulunur. Kısılma vanasında ısı geçişi olmadığından, $h_4=h_3=203,987 \text{ kJ/kg}$ 'dır.

$P_2=891,47 \text{ kPa}$ ve $s_2=s_1=0,696 \text{ kJ/kgK}$ için termodinamik tablolardan; $T_2=39,558^{\circ}\text{C}$ ve $h_2=203,987^{\circ}\text{C}$ olarak bulunur.

Birim soğutucu akışkan başına yaşam alanından çekilen ısı miktarı;

$$Q_{\text{evap}} / m_R = h_1 - h_4 = 187,397 - 71,461 = 115,936 \text{ kJ/kg} \text{ olarak bulunur.}$$

Binanın hesaplanan ısı kazancının 30 kW olduğunu kabul edersek çevrimde kullanılması gereken soğutucu akışkan miktarı;

$$Q_C / (h_1 - h_4) = 30 / 115,936 \cong 0,26 \text{ kg/s} \text{ olarak bulunur.}$$

Soğutucu akışkanın kütleli debisi belirlendikten sonra, sistemin yoğuşturucu kapasitesi, buharlaştırıcı kapasitesi ve kompresör gücü denklem (1.3)' ten faydalanarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$Q_{evap} = m_R (h_1 - h_4) = 0,26 \times (187,397 - 71,461) = 30,143 \text{ kW}$$

$$Q_{kond} = m_R (h_2 - h_3) = 0,26 \times (203,987 - 71,461) = 34,456 \text{ kW}$$

$$W_C = m_R (h_2 - h_1) = 0,26 \times (203,987 - 187,397) = 4,3134 \text{ kW}$$

Isı pompası çevriminin soğutma performans katsayısı COP denklem (1.3)'den faydalanarak;

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_C} = \frac{30,143}{4,3134} = 6,988 \text{ olarak bulunur.}$$

7.4 Yer Isı Değiştiricisinin Dizaynı

Binamızın bahçeli bir villa olduğu düşünülerek, yer ısı değiştiricisi yatay olarak dizayn edilmiştir. Yüksek ısı verim sağlamak amacıyla, sistem paralel akışlı olarak tasarlanmıştır.

Kuzey yarımküredeki yerleşim birimlerinde genellikle; binaların ısı kazançları, ısı kayıplarından daha büyüktür. Bundan dolayı, yer ısı değiştiricisinin dizaynı; soğutma mevsimindeki ısı ihtiyaçları karşılayacak şekilde yapılmalıdır.

Yer ısı değiştiricisinin dizaynında birçok önemli parametre vardır. Bu parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.;

1) Yer ısı değiştiricisinin geometrisi yani akış türü: Yer ısı değiştiricileri akış türlerine göre seri akışlı ve paralel akışlı olarak iki farklı geometride dizayn edilebilirler. Seri akışlı sistemler genellikle gerekli olan ısı enerjisi, daha büyük boru uzunluklarında sağlarlar.

2) Isı pompasının çalışma süresi: Topraktaki ısı transferi zamana bağlı olarak etkilendiğinden ısı pompasının çalışma süresinin hesaplanması gerekir.

3) Boru ağının çapı: Boru şebekesi, değişik çaplarda tasarlanabilir. Boru çapının artırılması modül sayısını azaltsa da, birim yüzeyden transfer olan ısı miktarının azalmasına neden olur. Temelde boru çapındaki küçülme, modül sayısını arttırsa da, ısı transfer yüzeyi de buna bağlı olarak artar. Ekte değişik çaptaki boruların özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

4) Yer ısı değiştiricisinin gömme derinliği: Yaz şartlarında, gömme derinliği arttıkça toprak sıcaklığı azalmaktadır. Dolayısıyla toprak ile yer ısı değiştirici içerisindeki ısı taşıyıcı akışkan arasındaki sıcaklık farkı, derinliğin artmasıyla doğru orantılı olarak artacaktır. Sıcaklık farkının artması birim yüzeyden transfer olan ısı miktarını arttırmasına rağmen, bu artış için daha fazla hafriyat yapılması gerektiğinden, sistemin ilk yatırım maliyeti bir hayli artacaktır.

5) Yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış hızı: Akış hızının artması bir modülden geçen ısı taşıyıcı akışkan miktarının artmasına sebep olur. Bu kütleli debi artışı kendisini modül sayısındaki azalmayla gösterir. Buna karşılık akış hızının arttırılması, yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın sürtünme kayıplarının ve sirkülasyon pompasının çektiği gücünün artmasına neden olur. Buda sistemin genel performansının düşmesine ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olur.

6) Yer ısı değiştiricisi içerisinde dolaştırılan akışkanın giriş-çıkış sıcaklıkları farkı: Giriş çıkış sıcaklık farkının artması gerekli olan su debisini ve dolayısıyla modül sayısını azaltır. Fakat çıkış sıcaklığı arttıkça, gerekli olan ısı için daha fazla boruya ihtiyaç duyulur.

Isı pompasının çalışma süresinin tespit etmeye çalışalım.

Topraktaki ısı transferi zamana bağlı olarak değiştiğinden, ısı pompasının çalışma süresinin belirlenmesi gerekir. Isı pompasının çalışma süreci ve aylık çalışma oranlarının hesaplanması için ASHRAE tarafından BİN (Aralık) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemden yararlanabilmek için; dış hava sıcaklıklarının geniş zaman aralıklarındaki (son 10 yıllık değerler) ortalamaları, binanın karakteristik K_bF değeri, bina içi hava sıcaklığının ortalama değeri ve ısı pompasının karakteristik değerleri bilinmelidir. İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı 33°C'dir. Binamızın soğutma yükünün 30kW, bina içindeki mahallerin ortalama sıcaklığı ise 20°C olduğu kabul edilmiştir. Buradan hareketle binanın K_bF değeri;

$$K_bF = \frac{Q_C}{T_d - T_i} = \frac{30}{33 - 20} = 2,308 \text{ kW/}^\circ\text{C} \text{ olarak bulunur.}$$

İstanbul için uzun yıllar sıcaklık ortalamalarını Meteoroloji Müdürlüğü'nden elde etmek mümkündür. Fakat çeşitli imkansızlıklar nedeniyle Meteoroloji Müdürlüğü'nden sadece 1999 yılı için ölçülmüş saatlik hava sıcaklıkları elde edilmiştir ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır. 1999 yılı için ölçülmüş saatlik hava sıcaklıkları ekte verilmiştir. Buna göre 1999 yılı saatlik dış hava sıcaklıklarına göre soğutma mevsimindeki sıcaklık gruplarının saatlik frekans dağılımları aşağıdaki çizelgedeki gibidir.

Çizelge 7.2 1999 yılında ölçülen yaz hava sıcaklıklarının saatlik dağılımları.

Sıcaklık Grubu (°C)	Grup orta noktası (°C)	Frekans (h)				
		Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül
22 - 24	23	72	153	145	148	173
24 - 26	25	35	107	223	172	79
26 - 28	27	12	56	143	137	31
28 - 30	29	4	27	106	98	4
30 - 32	31	0	3	61	48	0
32 - 34	33	0	6	7	16	0
34	34	0	2	0	1	0

Çizelge 7.2 şöyle yorumlanmalıdır; İstanbul Göztepe'de yıl içinde, mayıs ayında 72, haziran ayında 153, temmuz ayında 145, ağustos ayında 148, eylül ayında ise 173 saat 22 ve 23°C'lik dış hava sıcaklıkları ölçülmüştür.

Tüm bu veriler elde edildikten sonra, A kolonuna, dış hava sıcaklığı grup noktası, B kolonuna binanın karakteristik K_bF değeri, C kolonuna denge sıcaklığı, D kolonuna binanın saatlik kazanımı, E kolonuna ısı pompası kapasitesi, F kolonuna ısı pompasının çalışma oranı, G kolonuna ısı pompasının saatlik enerji tüketimi, H kolonuna soğutma saatleri frekansı, I kolonuna ısı pompasının çalışma süresi, J kolonuna ısı pompasının enerji tüketimi, K kolonuna binanın ısı kazancı, L kolonuna sirkülasyon pompasının enerji tüketimi, M kolonuna toprağa atılan net ısı miktarı değerlerinin girileceği bir tablo her ay için hazırlanır. Yukarıdaki bilgiler kullanılarak soğutma mevsimindeki her ay için söz konusu tablolar doldurularak çalışma süresinin, dönem süresine oranı olan ısı pompasının aylık çalışma oranı bulunur.

Çizelge 7.3 Mayıs ayı için sistemin sağladığı değerler.

MAYIS

Q_b	30	Binarın saatlik ısı kazancı (kW)		T_L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)						
T_d	33	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)		T_H	37	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)						
T_i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)		Q_{evap}	30,143	Evaporatör Kapasitesi (kW)						
T_{sul}	30	Suyun kondensere giriş sıcaklığı(°C)		m _R	0,26	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)						
N_p	0,56	Pompa gücü (kW)		COP _C	6,988	Soğutma performans katsayısı						
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binarın Karakteristik (K _{pF}) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binarın Saatlik Isı Kazancı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Soğutma Saadeti	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binarın Isı Kazancı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprağa Aktılan Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T_h	$Q_b/(T_i-T_d)$	T_i-T_h	$B \times C$	Q_{evap}	D/E	E/COP _C	EK-3	$H \times F$	$F \times G \times H$	$D \times H$	$N_p \times F \times H$	$J \times (COP_H-1) \times L$
23	-2,308	-3	6,92	30,143	0,2297	4,314	72	16,54	71,33	498	9,26	417,87
25	-2,308	-5	11,54	30,143	0,3828	4,314	35	13,40	57,79	404	7,50	338,55
27	-2,308	-7	16,15	30,143	0,5359	4,314	12	6,43	27,74	194	3,60	162,50
29	-2,308	-9	20,77	30,143	0,689	4,314	4	2,76	11,89	83	1,54	69,64
31	-2,308	-11	25,38	30,143	0,8421	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
33	-2,308	-13	30,00	30,143	0,9953	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
34	-2,308	-14	32,31	30,143	1,0718	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Toplam							123	39,12	168,75	1179	21,91	988,57

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,32

Çizelge 7.4 Haziran ayı için sistemin sağladığı değerler.

HAZİRAN

Q_b	30	Binanın saatlik ısı kazancı (kW)		T_L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)						
T_d	33	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)		T_H	37	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)						
T_i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)		Q_{evap}	30,143	Evaporatör Kapasitesi (kW)						
T_{sal}	30	Suyun kondensere giriş sıcaklığı(°C)		m _R	0,26	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)						
N_p	0,56	Pompa gücü (kW)		COP _C	6,988	Soğutma performans katsayısı						
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binanın Karakteristik ($K_p F$) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binanın Saatlik Isı Kazancı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Soğutma Saadeti Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binanın Isı Kazancı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T_h	$Q_b/(T_f - T_a)$	$T_f - T_h$	$B \times C$	Q_{evap}	D/E	E/COP_c	EK-3	$H \times F$	$F \times G \times H$	$D \times H$	$N_p \times F \times H$	$J \times (COP_H - 1) - L$
23	-2,308	-3	6,92	30,143	0,2297	4,314	153	35,14	151,58	1059	19,68	887,97
25	-2,308	-5	11,54	30,143	0,3828	4,314	107	40,96	176,68	1235	22,94	1035,00
27	-2,308	-7	16,15	30,143	0,5359	4,314	56	30,01	129,45	905	16,81	758,36
29	-2,308	-9	20,77	30,143	0,689	4,314	27	18,60	80,25	561	10,42	470,10
31	-2,308	-11	25,38	30,143	0,8421	4,314	3	2,53	10,90	76	1,41	63,84
33	-2,308	-13	30,00	30,143	0,9953	4,314	6	5,97	25,76	180	3,34	150,90
34	-2,308	-14	32,31	30,143	1,0718	4,314	2	2,14	9,25	65	1,20	54,17
Toplam							354	135,35	583,86	4080	75,80	3420,34

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,38

Çizelge 7.5 Temmuz ayı için sistemin sağladığı değerler.

TEMMUZ

Q_b	30	Binanın saatlik ısı kazancı (kW)			T_L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)					
T_d	33	İstanbul için dış hava tasarım sıcaklığı (°C)			T_H	37	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)					
T_i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			Q_{evap}	30,143	Evaporatör Kapasitesi (kW)					
T_{su1}	30	Suyun kondensere giriş sıcaklığı(°C)			m _g	0,26	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)					
N_p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP_c	6,988	Soğutma performans katsayısı					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binanın Karakteristik (K _p) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binanın Saatlik Isı Kazancı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Soğutma Saadeti	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binanın Isı Kazancı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprağa Aktılan Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T_h	$Q_b/(T_i-T_d)$	T_i-T_h	$B \times C$	Q_{evap}	D/E	E/COP_c	EK-3	$H \times F$	$F \times G \times H$	$D \times H$	$N_p \times F \times H$	$J \times (COP_H-1)-L$
23	-2,308	-3	6,92	30,143	0,2297	4,314	145	33,30	143,65	1004	18,65	841,54
25	-2,308	-5	11,54	30,143	0,3828	4,314	223	85,36	368,21	2573	47,80	2157,06
27	-2,308	-7	16,15	30,143	0,5359	4,314	143	76,63	330,57	2310	42,92	1936,52
29	-2,308	-9	20,77	30,143	0,689	4,314	106	73,04	315,05	2202	40,90	1845,59
31	-2,308	-11	25,38	30,143	0,8421	4,314	61	51,37	221,59	1548	28,77	1298,11
33	-2,308	-13	30,00	30,143	0,9953	4,314	7	6,97	30,05	210	3,90	176,05
34	-2,308	-14	32,31	30,143	1,0718	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Toplam							685	326,67	1409,12	9847	182,94	8254,87

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,48

Çizelge 7.6 Ağustos ayı için sistemin sağladığı değerler.

AĞUSTOS

Q_b	30	Binanın saatlik ısı kazancı (kW)	T_L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)							
T_d	33	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)	T_H	37	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)							
T_i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)	Q_{evap}	30,143	Evaporatör Kapasitesi (kW)							
T_{sal}	30	Suyun kondensere giriş sıcaklığı(°C)	m $\dot{r}$	0,26	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)							
N_p	0,56	Pompa gücü (kW)	COP_c	6,988	Soğutma performans katsayısı							
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binanın Karakteristik ($K_p F$) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binanın Saatlik Isı Kazancı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Soğutma Saadeti	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binanın Isı Kazancı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprağa Aktarılan Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T_h	$Q_b/(T_r-T_d)$	T_r-T_h	$B \times C$	Q_{evap}	D/E	E/COP_c	EK-3	$H \times F$	$F \times G \times H$	$D \times H$	$N_p \times F \times H$	$J \times (COP_H-1)-L$
23	-2,308	-3	6,92	30,143	0,2297	4,314	148	33,99	146,62	1025	19,04	858,95
25	-2,308	-5	11,54	30,143	0,3828	4,314	172	65,84	284,00	1985	36,87	1663,74
27	-2,308	-7	16,15	30,143	0,5359	4,314	137	73,42	316,70	2213	41,11	1855,27
29	-2,308	-9	20,77	30,143	0,689	4,314	98	67,52	291,27	2035	37,81	1706,30
31	-2,308	-11	25,38	30,143	0,8421	4,314	48	40,42	174,36	1218	22,64	1021,46
33	-2,308	-13	30,00	30,143	0,9953	4,314	16	15,92	68,69	480	8,92	402,39
34	-2,308	-14	32,31	30,143	1,0718	4,314	1	1,07	4,62	32	0,60	27,08
Toplam							620	298,19	1286,27	8988	166,99	7535,20

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,48

Çizelge 7.7 Eylül ayı için sistemin sağladığı değerler.

EYLÜL

Q _b	30	Binanın saatlik ısı kazancı (kW)		T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)	
T _d	33	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)		T _H	37	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)	
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)		Q _{evap}	30,143	Evaporatör Kapasitesi (kW)	
T _{sal}	30	Suyun kondensere giriş sıcaklığı(°C)		m _R	0,26	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)	
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)		COP _c	6,988	Soğutma performans katsayısı	

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binanın Karakteristik (K _p F) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binanın Saatlik Isı Kazancı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Soğutma Saadeti Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binanın Isı Kazancı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprağa Aktarılan Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _b /(T _f -T _a)	T _f -T _h	B x C	Q _{evap}	D/E	E/COP _c	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
23	-2,308	-3	6,92	30,143	0,2297	4,314	173	39,73	171,39	1198	22,25	1004,05
25	-2,308	-5	11,54	30,143	0,3828	4,314	79	30,24	130,44	912	16,93	764,16
27	-2,308	-7	16,15	30,143	0,5359	4,314	31	16,61	71,66	501	9,30	419,80
29	-2,308	-9	20,77	30,143	0,689	4,314	4	2,76	11,89	83	1,54	69,64
31	-2,308	-11	25,38	30,143	0,8421	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
33	-2,308	-13	30,00	30,143	0,9953	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
34	-2,308	-14	32,31	30,143	1,0718	4,314	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
Toplam							287	89,34	385,39	2693	50,03	2257,66

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,31

Isı pompasının toplam çalışma süresi yukarıda yer alan çizelgelerdeki, I kolonlarında elde edilen değerlerin toplanması ile 38 gün olarak bulunur. Bu çizelgelerden elde edilen bilgilere göre ısı pompası; mayıs ayında 2 gün, haziran ayında 6gün, temmuz ayında 14 gün, ağustos ayında 12 gün ve eylül ayında ise 4 gün olmak üzere toplam 38 gün çalışmıştır.

Bir önceki bölümde sabit yüzey sıcaklığı kabulüne göre zamana bağlı olarak transfer olan ısı miktarının hesaplanması anlatılmıştı. Çok yaygın olarak uygulanan diğer hesap yöntemlerinde yer ısı değiştiricisinin boyu sadece ısı kazanımının en fazla olduğu ay için hesaplanır. Fakat sabit yüzey sıcaklığı kabulüne göre yapılan hesaplamalarda; bir önceki ayda olan ısı transferinin bir sonraki aya da etkisi göz önüne alındığından, ısı pompasının toplam çalışma süresinde, sanki bir defa çalışarak gerekli olan soğutma kapasitesini sağlayacak şekilde, yer ısı değiştiricisi boyutlandırılır.

Yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın giriş çıkış sıcaklıkları farkını belirleyelim.

Yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın giriş çıkış sıcaklıkları farkının incelenmesi için 130cm derinliğe gömülmüş 1" lik borulardan oluşan paralel akışlı, yer ısı değiştiricisini değişik giriş çıkış akışkan sıcaklıklarında boyutlandırılalım. Aşağıda 2°C sıcaklık farkı esasına göre çalışan bir yer ısı değiştiricisinin hesaplamaları ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

İstanbul Göztepe'deki toprağın ısı difüzyon katsayısı ve ısı iletim katsayıları sırasıyla çizelge 4.2'den; $\alpha_t = 0,0261 \text{ fph}$ ve $k_t = 1,2 \text{ fph}$ olarak toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana bağlı değişimi incelenirken bulunmuştu. Çizelge 7.1 den 130 cm derinlikteki toprağın maksimum sıcaklığının $T_{\max} = 22,17^\circ\text{C}$ olduğu görülür. Gene, çizelge 7.1'den faydalananarak, yer ısı değiştiricisine ısı taşıyıcı akışkanın giriş sıcaklığı; soğutma sezonunda ise 30°C olarak seçilmişti. Dolayısıyla ısı taşıyıcı akışkanın yer ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı 28°C olacaktır.

29°C 'lik ortalama sıcaklık için suyun özgül ısınma ısı ve yoğunluğu, suyun termofiziksel özellikleri tablosundan $C_p = 4,1785 \text{ kJ/kg}$ ve $\rho = 996,016 \text{ kg/m}^3$ olarak okunur. Suyun akış hızı $0,50 \text{ m/s}$ olarak alınsın. Dolayısıyla, bir modülden geçen suyun kütleli debisi,

$$m = \rho \cdot A \cdot u = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot u = 996,016 \cdot \frac{\pi \cdot (1,075 \times 0,0254)^2}{4} \cdot 0,5 = 0,292 \text{ kg/s} \text{ olarak bulunur.}$$

Paralel akışlı yer ısı değıştircisinin, 30/28°C su sıcaklıklarında çalışması halinde, tüm sistem için gerekli olan su debisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$m_{toplaml} = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{34,16}{4,1785 \cdot 2} = 4,123 \text{ kg/s}$$

Bir borudan geçen suyun kütleel debisi yukarıda 0,292kg/s olarak bulunmuştı. Dolayısıyla 2°C' lik sıcaklık düşüşü için gerekli olan boru sayısı (modül sayısı);

$$n_{boru} = m_{toplaml} / m = 4,123 / 0,292 = 14,14 \text{ adet olarak bulunur}$$

Borunun yarıçapı; $r = (d/2) \cdot (1/12) = (1,075/2) \cdot (1/12) = 0,0448 \text{ ft}$ dir. Verilen değerler yerine konularak integrasyon sabiti $z = a_t / r^2 = 0,0261 \cdot 38 \times 24 / 0,167^2 = 11861,27$ olarak bulunur.

İntegrasyon sabiti $z=11861,27$ için $F(z)$ integralinin değeri çizelge 6.2'den $F(z)=1,21$ olarak bulunur. Boru başlangıç ve sonunda, birim boy boruya transfer olan ısı miktarı denklem (6.7)'den faydalanarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$Q_{z1} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (30 - 22,17) \times 1,8 \cdot 1,98 = 19,71 \text{ W/m,}$$

$$Q_{z2} = 0,961519 \cdot k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) = 0,961519 \cdot 1,2 \cdot (28 - 22,17) \times 1,8 \cdot 1,98 = 14,68 \text{ W/m}$$

1 modül için gerekli olan boru boyu L;

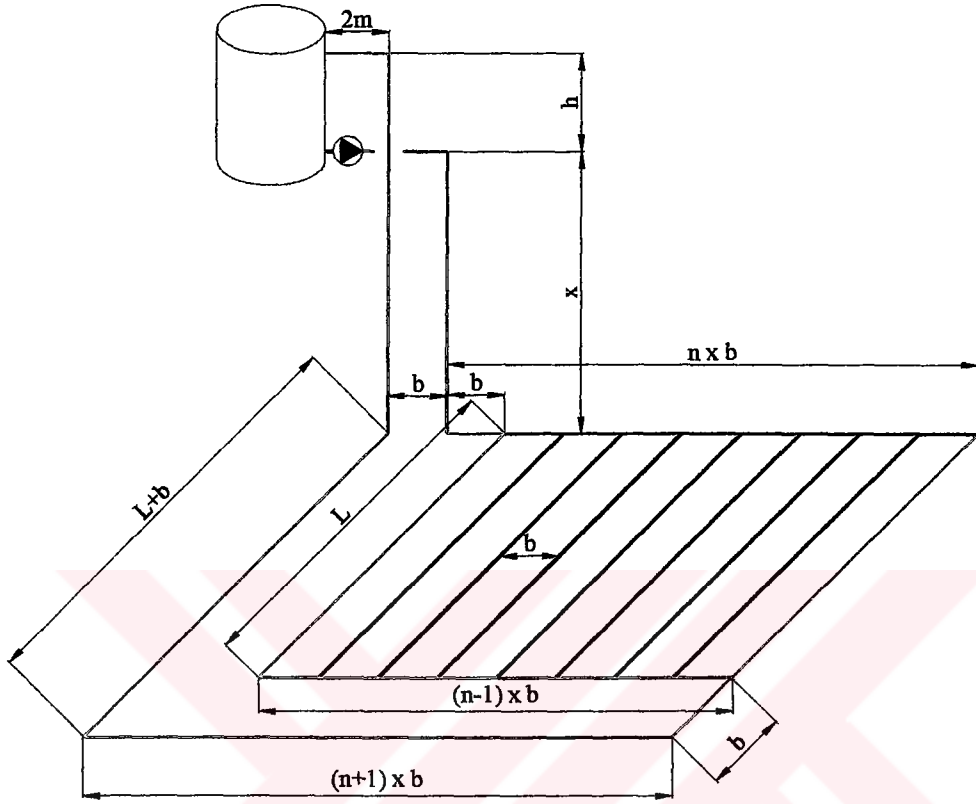
$$L = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_{sg} - T_{sç})}{(Q_{z1} + Q_{z2})/2} = \frac{0,292 \cdot 4,1785 \cdot (30 - 28) \times 1000}{(19,71 + 14,68)/2} = 141,72 \text{ m olmalıdır.}$$

Toplam boru boyu ise (14,14 modül için);

$$\sum L = n_{boru} \cdot L = 14,14 \times 141,72 = 2003,79 \text{ m olarak bulunur.}$$

Paralel akışlı yer ısı değıştircisinin izometrik şeması gösterilmiştir. Verilen ölçüler boru metrajının bulunmasında kullanılacaktır.

Buna göre modüllerde sıcaklığı düşürülen ısı taşıyıcı akışkan, 3" lik kollektörlerle toplanarak, boyler tipi ısı eşanjöründe soğutucu akışkan ile ısı alış verişinde bulunması sağlanır. Isı taşıyıcı akışkan, ısı eşanjöründen çıkarak tekrar 30°C' de yer ısı değıştiricisine girer.



Şekil 7.2 Paralel akışlı yer ısı değıştiricisinin izometrik şeması.

Şekil 7.2'de; "L" bir modülün boru boyunu, "n" modül sayısını, "x" yer ısı değıştiricisinin gömme derinliğini, "h" boyler tipi ısı eşanjörünün yüksekliğini, "b" iki paralel boru arasındaki yatay mesafeyi temsil eder. Kırmızı renkli hatlar ise kritik devre boru hattını belirtmektedir.

Hesaplamalarımızda, boyler tipi ısı eşanjörünün yüksekliği $h=1,5\text{m}$, paralel iki boru arasındaki yatay mesafe $b=1\text{m}$ olarak kabul edilmiştir. Buna göre sistemin gereksinim duyduğu kollektör borularının toplam uzunluğu aşağıdaki ifade yardımıyla,

$$\sum L_K = h + 2 \cdot x + n \cdot b + (n-1) \cdot b + b + (n+1) \cdot b + L_{\text{modül}} + b + 4 \quad (7.3)$$

$$\sum L_K = 1,5 + 2 \cdot 1,3 + 14,14 \cdot 1 + (14,14 - 1) \cdot 1 + 1 + (14,14 + 1) \cdot 1 + 141,72 \cdot 1 + 4 = 207,4\text{m}$$

olarak bulunur.

Şimdi de şekil 7.2’de paralel akışlı yer ısı değıştiricisi için pompanın karakteristik bilgilerini elde etmek amacıyla, kritik devre boru çapı hesabı yapalım. Pompanın basma yüksekliği aşağıdaki ifadeyle bulunur.

$$H_m = H_g + \sum \Delta H_{Lin} + \sum \Delta H_{Lok} \quad (7.4)$$

Denklem (7.4)’te “ H_g ” pompanın geometrik basma yüksekliğini, “ $\sum \Delta H_{Lin}$ ” kritik devredeki lineer basınç kaybını, “ $\sum \Delta H_{Lok}$ ” ise kritik devredeki lokal basınç kayıplarını belirtmektedir. Pompanın geometrik basma yüksekliğinin, ısı eşanjörü yüksekliğine eşit olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Kritik devredeki lineer basınç kaybı aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$\Delta H_{Lin} = \lambda \times \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (7.5)$$

Buradaki; “ λ ” lineer yük kaybı katsayısıdır ve yer ısı değıştiricisi içindeki akışın türüne bağlı olarak hesaplanır. Bir ortamdaki akışın türü boyutsuz “ Re ” sayısı ile belirlenir.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu_s} \quad (7.6)$$

$Re < 2320$ ise “akış laminerdir” ve λ aşağıdaki ifade ile bulunur;

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (7.7)$$

$2320 < Re < 100000$ ise “akış türbülanslıdır” ve λ aşağıdaki ifade ile bulunur;

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (7.8)$$

$100000 < Re < 2000000$ ise “akış türbülanslıdır” ve λ aşağıdaki ifade ile bulunur;

$$\lambda = 0,0054 + \frac{0,396}{Re^{0,3}} \quad (7.9)$$

$10^5 < Re < 10^8$ ise “akış türbülanslıdır” ve λ aşağıdaki ifade ile bulunur;

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \quad (7.10)$$

Denklem (7.6)’da “ μ_s ” suyun dinamik viskozitesidir. 29°C’lik ortalama sıcaklık için suyun dinamik viskozitesi, suyun termofiziksel özellikleri gösteren tablodan $\mu_s = 0,000812$ Ns/m² olarak okunur.

Bu bilgiler ışığında, bir modüldeki lineer basınç kaybını bulmaya çalışalım. İlk olarak modüldeki akış türünü belirlemek amacıyla, “Re” sayısını hesaplayalım.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu_s} = \frac{996,016 \cdot 0,50 \cdot (1,075 \times 0,0254)}{0,000812} \cong 16746$$

$2320 < Re < 100000$ olduğundan “akış türbülanslıdır” ve denklem (7.8)’ den faydalanarak λ ;

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{16746}} = 0,0277 \text{ olarak bulunur.}$$

Buradan hareketle, bir modüldeki lineer basınç kaybı denklem (7.5) kullanılarak bulunabilir.

$$\Delta H_{Lin} = \lambda \times \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} = 0,0251 \cdot \frac{141,72}{(1,075 \times 0,0254)} \cdot \frac{0,5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,84 \text{ m}$$

Kollektör borularındaki lineer basınç kaybını bulmak için, önce kollektörde ki akış hızının tespit edilmesi gerekir. Modüllerde dolaştırılan su kollektörler vasıtasıyla toplandığından, kollektördeki su debisi, sistemin toplam debisine eşittir. Dolayısıyla kollektörde ısı taşıyıcı akışkanın, akış hızı;

$$u_K = \frac{m}{\rho \cdot A} = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 4,123}{996,016 \cdot \pi \cdot (3,048 \cdot 0,0254)^2} = 0,88 \text{ m/s olarak bulunur.}$$

Kollektördeki akışın türünün belirleyelim;

$$Re_K = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu_s} = \frac{996,016 \cdot 0,88 \cdot (3,048 \times 0,0254)}{0,000812} \cong 83508$$

2320 < Re < 100000 olduğundan “akış türbülanslıdır” ve denklem (7.8)’ den faydalanarak λ ;

$$\lambda_K = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re_K}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{83508}} = 0,019 \text{ olarak bulunur.}$$

Buradan hareketle, kollektörlerin lineer basınç kaybı, denklem (7.5) kullanılarak bulunabilir.

$$\Delta H_{Lin} = \lambda_K \times \frac{L_K}{d} \cdot \frac{u_K^2}{2g} = 0,019 \cdot \frac{207,4}{(3,048 \times 0,0254)} \cdot \frac{0,87^2}{2 \cdot 9,81} = 1,95 \text{ m}$$

Yer ısı değıştircisindeki lokal kayıplar, “ ζ ” lokal kayıp yük katsayısı olmak kaydıyla, aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\Delta H_{Lok} = \zeta \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (7.11)$$

Aşağıdaki çizelgede, yer ısı değıştircisinde meydana gelen lokal kayıplar, değışik giriş-çıkış sıcaklıkları için gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 Yer ısı değıştircisinde meydana gelen lokal kayıplar.

ΔT	1	2	3	ΔT	1	2	3
ζ	Adet	Adet	Adet	Elemanlar	h_L	h_L	h_L
0,5	6	6	6	Dirsek	0,038	0,038	0,038
0,1	1	1	1	Ayrılma	0,001	0,001	0,001
0,1	28,28	14,14	9,43	Birleşme	0,036	0,018	0,012
2	2	2	2	Vana	0,051	0,051	0,051
				$\Sigma \Delta H_{Lok}$	0,13	0,11	0,10

Çizelge 7.8’den de görüldüğü gibi lokal kayıplar, lineer kayıpların yanında çok küçük değerler almaktadır. Dolayısıyla lokal kayıpları ihmal etmek mümkündür. Yukarıda lokal kayıplar hesaplanırken, bütün elemanlardaki hızlar 0,5m/s alınarak işlemleri kolaylaştırma yoluna gidilmiştir.

Tüm lokal ve lineer kayıplar hesaplandığına göre denklem (7.4) kullanılarak artık pompanın basma yüksekliğini belirlemek mümkündür.

$$H_m = H_g + \sum \Delta H_{Lin} + \sum \Delta H_{Lok} = 1,5 + (1,84 + 1,95) + 0,11 = 5,39 \text{ m}$$

Pompanın manometrik basma yüksekliği bilindiğine göre, pompanın efektif gücünü hesaplamak mümkündür. Pompanın verimi %60 olarak alınmıştır.

$$N_e = \frac{m \cdot g \cdot H_m}{\eta_p} \quad (7.12)$$

$$N_e = \frac{m \cdot g \cdot H_m}{\eta_p} = \frac{4,123 \cdot 9,81 \cdot 5,39}{0,6} = 363,6W = 4,85HP \text{ olarak bulunur.}$$

Pompa motorunun gücü bulunan efektif pompa gücünün bir emniyet katsayısı ile çarpılmasıyla bulunur. Bu emniyet katsayısı, pompanın efektif gücüne bağlı olarak tespit edilir. Pompanın efektif gücünün 5HP'den küçük olması durumunda, emniyet katsayısı 1,3 tür. Pompanın efektif gücünün 5HP'den büyük, 25HP'den küçük olması durumunda, emniyet katsayısı 1,2 pompanın efektif gücünün 25HP'den büyük olması durumunda ise, emniyet katsayısı 1,1 dir.

$$N_m = \alpha_{emn} \cdot N_e \quad (7.13)$$

$N_e < 5HP$ olduğundan emniyet katsayısı $\alpha_{emn} = 1,3$ olmalıdır. Bu durumda pompa gücü;

$$N_m = \alpha_{emn} \cdot N_e = 1,3 \cdot 363,6 \cdot 10^{-3} = 0,47 \text{ kW olarak bulunur.}$$

Sistemin genel performansını; elde edilmesi gereken değer, harcanan gereken değere oranı olarak tanımlayalım. Sisteminiz binanın soğutma ihtiyacını karşılamak üzere ısıyı toprağa, kompresör ve pompa işlerini vererek attığına göre, sistemin, genel performansı aşağıdaki gibi ifade edilir. Genel performans katsayısı sistemin işletme giderleri hakkında bize fikir verir. Genel performansın düşmesi işletme maliyetlerinin artmasına sebep olur. Bu sebepten ötürü sistemin genel performansının, yatırım maliyetine de bağlı olarak olabildiğince yüksek olması istenir. (Babür, 1986)

$$COP_G \frac{Q_{evap}}{W_c + N_m} \quad (7.14)$$

$$COP_G \frac{Q_{evap}}{W_c + N_m} = \frac{30,143}{4,313 + 0,47} = 6,30$$

Sistemin genel performansını bulduktan sonra belli bir işletme süresinde, oluşacak olan işletme maliyetlerini inceleyelim. (Ataman, 1985)

j Yılı için yıllık işletme maliyetlerinin bugünkü değeri;

$$C_j = E \cdot \left[\frac{1+F_\theta}{1+i} \right]^j + (1+B_a) \quad (7.15)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Projenin bugünkü toplam değeri;

$$C_t = YM + E \cdot \sum_1^n \left[\frac{1+F_\theta}{1+i} \right]^j \cdot (1+B_a) \quad (7.16)$$

ifadesi ile verilmiştir. Bugünkü değer faktörü

$$C = \sum_1^n \left[\frac{1+F_\theta}{1+i} \right]^j \quad (7.17)$$

olarak düzenlenirse; projenin bugünkü değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_t = YM + E \cdot C \cdot (1+B_a) \quad (7.18)$$

Burada, “n” yıl cinsinden proje ömrünü, “i” faiz oranını, “F_θ” elektrik fiyatının artış oranını, “B_a” bakım masraflarının elektrik giderlerine oranını; “E” bugünkü yıllık harcanan elektriğin maliyetini temsil etmektedir. Dikkat edilirse, denklemin (7.18)’ de ifadenin en sağ tarafı işletme giderlerini belirtmektedir. “E” terimini aşağıdaki gibi daha açık yazarak işletme giderlerini sistemin genel performansı cinsinden ifade edebiliriz.

$$E = EBF \cdot (W_c + \dot{N}_m) \cdot t = EBF \cdot (Q_{evap} / COP_G) \cdot t \quad (7.19)$$

$$\dot{I}G = C \cdot EBF \cdot (Q_{evap} / COP_G) \cdot (1 + B_a) \cdot t \quad (7.20)$$

Tezimizde işletme giderleri sadece 5 yıllık bir dönem için hesaplanmıştır. Faiz oranını $i=0,4$, elektrik fiyatının artış oranı $F_\theta=0,50$, bakım masraflarının elektrik giderlerine oranı $B_a=\%10$; birim elektrik fiyatı $EBF=50000 \text{ TL/kWh}$ olarak alınmıştır. “C” bugünkü değer faktörü, hesap yapılan yıl veya proje ömrü ve $1 - [(1 + F_\theta)/(1 + i)]$ bağlı olarak ek-4’teki tablodan alınmıştır. Bu veriler ışığında, 5 yıllık bir dönem için işletme giderleri

$$\dot{I}G = 6.313 \cdot 50000 \cdot (30,143 / 6,30) \cdot (1 + 0,1) \cdot (38 \times 24) = 1,553 \text{ Milyar TL olarak bulunur.}$$

Yer ısı değiştirici dizaynında, kısıtlayıcı etkisiyle öne çıkan önemli bir diğer parametrede gerekli olan bahçe alanıdır. Yer ısı değiştiricilerinde gerekli olan enerjinin minimum bahçe alanından sağlanması istenir.

Boru boyu ve pompa gücü hesaplandıktan sonra şekil 7.2’yi göz önüne alarak şimdi de, ekonomik analiz yapmak için gerekli olan bahçe alanı ile hafriyat hacmini hesaplayalım.

$$V_{hafri} = [(n \cdot b \cdot G_v) + (L \cdot n \cdot G_v) + (n \cdot b + 3b + L) \cdot G_v] \cdot x \quad (7.21)$$

$$A_b = n \cdot L \cdot b \quad (7.22)$$

Denklem 7.14’de G_v vinç kepçesinin ağız genişliğidir. Hesaplamalarımızda, vinç kepçesinin ağız genişliği $G_v=0,5m$ olarak alınmıştır.

$$V_{hafri} = [(14,14 \cdot 1 \cdot 0,5) + (141,72 \cdot 14,14 \cdot 0,5) + (14,14 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 141,72) \cdot 0,5] \cdot 1,3 = 1415 \text{ m}^3$$

$$A_b = 14,14 \cdot 141,72 \cdot 1 = 2003,79 \text{ m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Bahçe alanından optimum faydalanabilmek için borular evin çevresinden dolaştırılabilir. Bu şekilde daha makul bir alan kullanılmış olur.

Tüm sistemin yatırım maliyeti temelde beş ana gruptan oluşur. Bina içi tesisatının maliyeti, yer ısı değiştiricisinin maliyeti, ısı pompası çevriminin elemanlarının maliyeti, pompa maliyeti ve hafriyat maliyeti toplam yatırım maliyetini meydana getirir. Fakat tezimizde, toprak kaynaklı ısı pompalarının optimizasyonunun yapılması hedeflendiğinden, tüm koşullarda, ortam olan hafriyat maliyetleri hesaba katılmamıştır. Bina içi tesisatın maliyeti ile ısı pompası çevriminin elemanlarının maliyetleri, söz konusu ortak maliyetleri oluştururlar. Bunun dışında pompa fiyatının düşük olması ve yaklaşık olarak her farklı durum için aynı maliyete sebep olması nedeniyle, pompa maliyeti de, hesap kapsamından çıkarılmıştır. Buna göre yatırım maliyeti, yer ısı değiştiricisinin ve hafriyat maliyetinin esas alınması ile yapılabilir. Birim hafriyat hacminin maliyeti 6.500.000TL/m³, 1" borunun birim boy maliyeti 602.975 TL/m, ve 3" kollektör borusunun birim boy maliyeti 3.157.150 TL/m olduğuna göre; toplam yatırım maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$YM = V_{hafr} \cdot BHM + L \cdot BBF + L_{Kol} \cdot BKM \quad (7.23)$$

$$YM = 1414,9 \cdot 6.500.000 + 2003,79 \cdot 602.975 + 207,4 \cdot 3.157.150 = 11,060 \text{ Milyar TL}$$

Şu ana kadar yaptığımız hesaplamaların tüm aşamalarında, suyun yer ısı değiştiricisine 30°C' de girdiğini ve yer ısı değiştiricisinden 28°C' de çıkmasının en uygun sonuçları vereceğini düşündük. Aşağıdaki çizelgede; suyun yer ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklıklarının 29°C, 28°C ve 27°C olması durumunda yukarıda anlatılan şekilde yapılan hesaplamaların sonucunda bulunan, yatırım maliyeti, işletme giderleri, gerekli olan bahçe alanı, genel performans ve pompa gücü değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.9 Değişik su çıkış sıcaklıkları için hesaplanan değerler.

ΔT	1	2	3
N_p	1,48	0,47	0,34
COP_G	5,20	6,30	6,47
YM	10.139	11.060	12.372
İG	1.880	1.553	1.510
A_b	1867,16	2003,74	2162,09

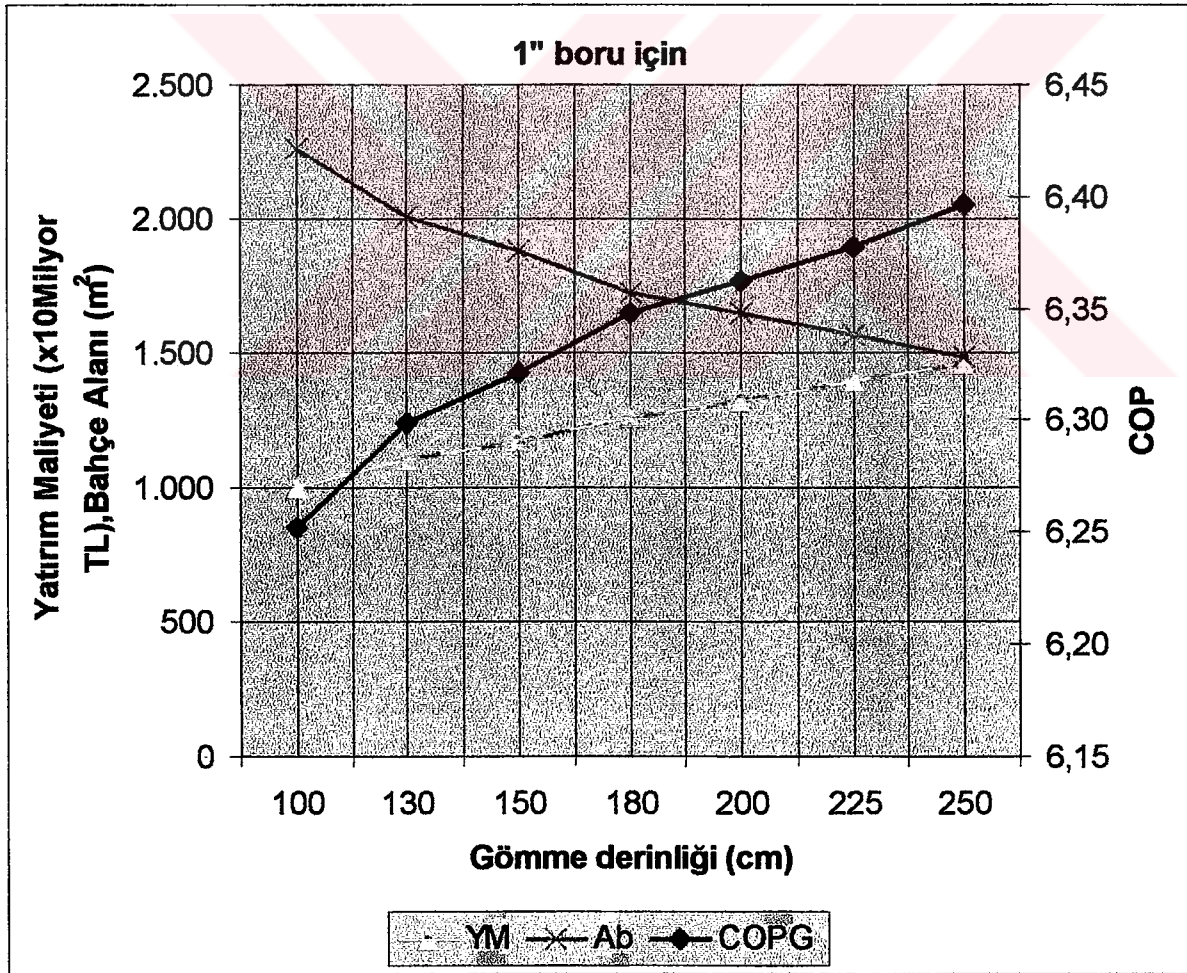
Çizelge 7.9'dan görüldüğü gibi giriş-çıkış sıcaklıkları 30/28°C olan dizayn en uygun sonuçları vermektedir.

Şimdi de değişik gömme derinliklerinde, sistemin tasarlanması durumunda elde edilecek değerleri karşılaştırarak, optimum gömme derinliğini belirlemeye çalışalım. Aşağıdaki çizelgede değişik gömme derinlikleri için elde edilen değerler gösterilmektedir.

Çizelge 7.10 Değişik toprak derinlikleri için hesaplanan değerler.

x	100	130	150	180	200	225	250
COP_c	6,25	6,30	6,32	6,35	6,36	6,38	6,40
YM	1.003	1.106	1.171	1.263	1.324	1.398	1.461
A_b	2.258	2.004	1.877	1.726	1.647	1.564	1.484

Çizelge 7.10'da elde edilen değerler, aşağıdaki şekilde grafik olarak verilmiştir. Bu grafiğe bakarak, en uygun gömme derinliği seçilebilir.



Şekil 7.3 Optimum gömme derinliği grafiği.

Şekil 7.3'e dikkat edildiğinde, gömme derinliği arttıkça, yatırım maliyeti ve sistemin genel performansı artarken, gerekli olan bahçe alanının azaldığı görülmektedir. Gömme derinliğinin artması sonucu sistemin genel performansının artması buna karşılık gerekli olan bahçe alanının azalması oldukça olumlu değişimler olmasına rağmen, burada sınırlayıcı faktör olarak sistemin ilk yatırım maliyeti devreye girer. Sistemin genel performansının değişimi çok az olduğundan, optimum derinlik seçimi diğer iki büyüklük ağırlıklı olarak yapılır. İlk yatırım maliyetinin ve gerekli olan bahçe alanının makul ölçülerde olması göz önüne alındığında, optimum gömme derinliği 130cm olarak tespit edilebilir.

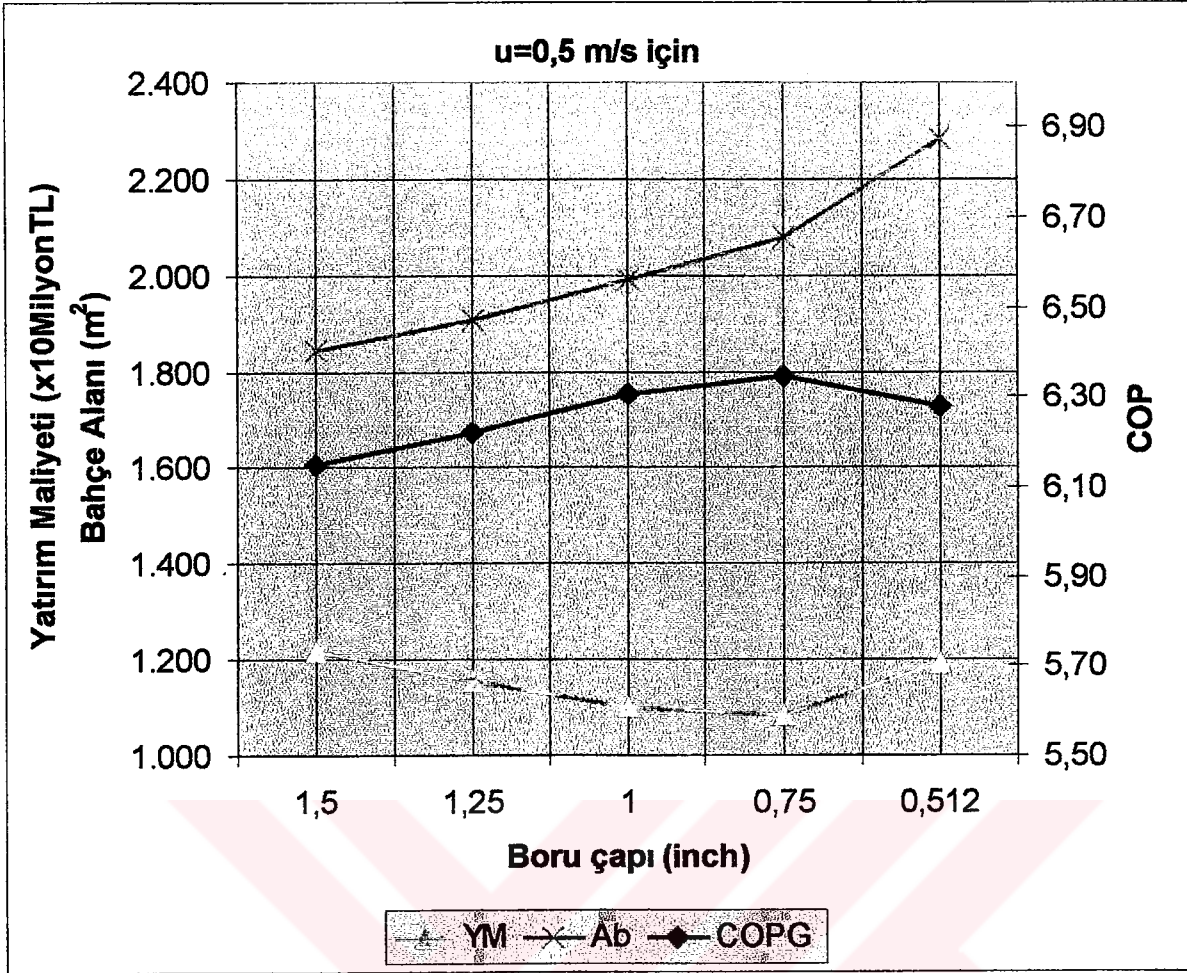
Yukarıda yapılan hesaplamalarda, boru çapı 1" olarak alınmıştı. Bu yaklaşımın doğruluğunu kabul etmek için, değişik boru çaplarında, sistemin tasarlanması durumunda elde edilecek değerleri karşılaştırarak, optimum boru çapını belirlemeye çalışalım. Aşağıdaki çizelgede değişik boru çapları için elde edilen değerler gösterilmektedir.

Çizelge 7.11 Değişik boru çapları için hesaplanan değerler.

d	1,5	1,25	1	0,75	0,512
COP _G	6,15	6,22	6,30	6,35	6,28
YM	1.216	1.153	1.106	1.083	1.194
A _b	1.845	1.905	2.004	2.078	2.281

Çizelge 7.11'den elde edilen değerler, aşağıdaki şekilde grafik olarak verilmiştir. Bu grafiğe bakarak, en uygun boru çapı seçilebilir.

Şekil 7.4'e dikkat edildiğinde, boru çapı arttıkça, (crosslink boru hariç) yatırım maliyeti artarken, sistemin genel performansı ve gerekli olan bahçe alanının azaldığı görülmektedir. Boru çapının artması sonucu gerekli olan bahçe alanının azalması oldukça olumlu bir durum olmasına rağmen, burada sınırlayıcı faktör olarak sistemin ilk yatırım maliyeti ve sistemin genel performansı devreye girer. Optimum boru seçimi ilk yatırım maliyetinin ve gerekli olan bahçe alanının makul ölçülerde olması göz önüne alındığında, sistemin genel performansında ki düşme kabul edilebilir bir durum olarak karşımıza çıkar. Bu durumda optimum boru çapı 1" olarak tespit edilebilir. Bunun yanı sıra şayet bahçe alanı müsait ise, yatırım maliyetlerindeki düşüklüğü ve sistemin genel performansının yüksekliği sebebiyle boru çapı 3/4" olarak da kullanılabilir. Buna karşılık gerekli bahçe alanı mevcut değilse, boru çapı olarak, 1 1/2" boru seçilebilir.



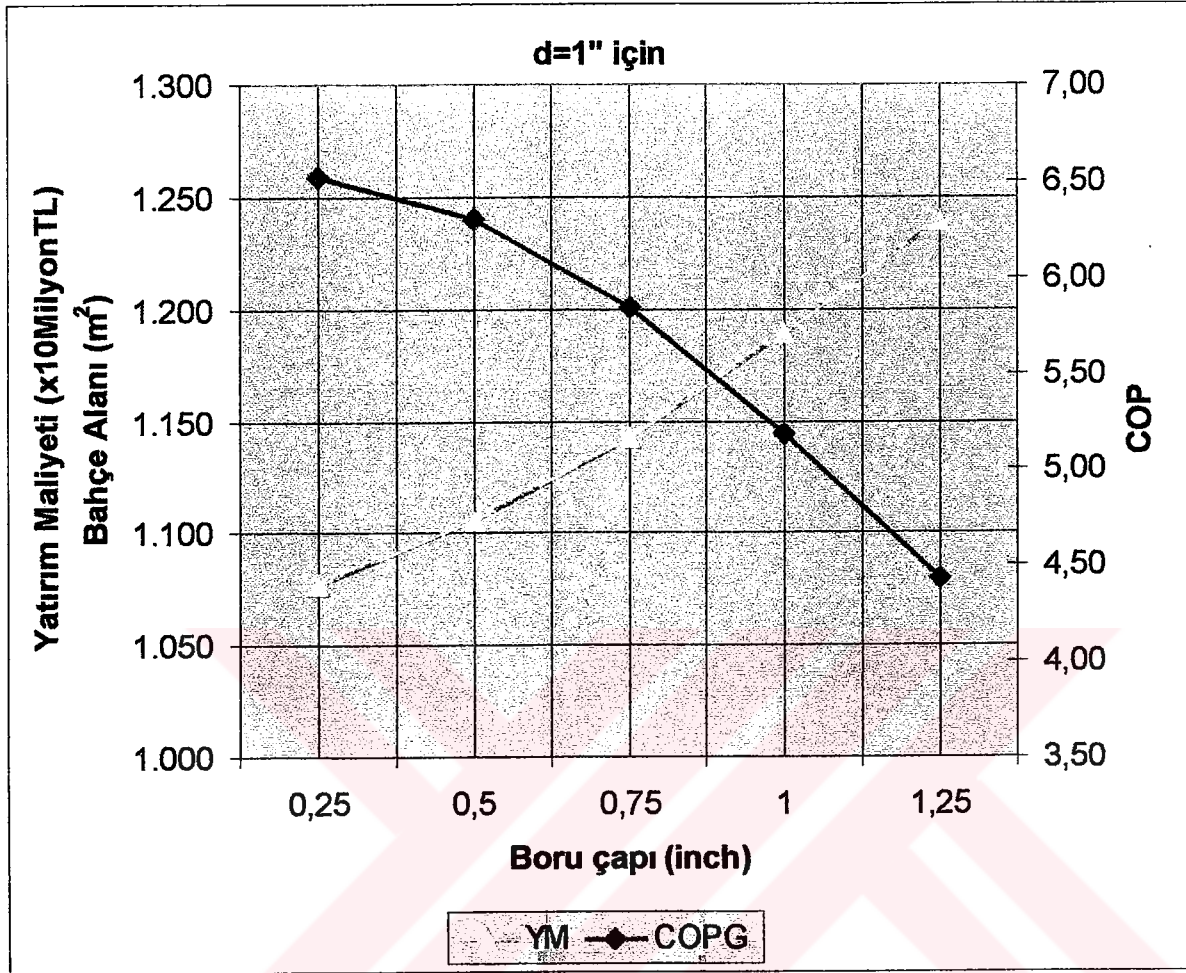
Şekil 7.4 Optimum boru çapı grafiği.

Yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın akış hızının değişimi sistemin yatırım maliyetini çok etkilememektedir. Gerekli olan bahçe alanı ise her durum için eşittir. Bu sebeplerden ötürü hızın seçimi serbest olduğu düşünülse de; (sürtünme kayıpları) sistemin genel performansı ve ısı transfer yüzeyi açısından aynı durum değerlendirildiğinde akış hızının mümkün olduğu kadar düşük olmasında fayda vardır. Bu durumda akış hızının 0,5m/s olarak tespit edilmesinde herhangi bir sakınca yoktur. Aşağıdaki çizelgede değişik hız değerleri göz önüne alınarak yapılan hesaplamaların sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.12 Değişik akış hızları için hesaplanan değerler.

u	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
COP _c	6,52	6,30	5,84	5,18	4,43	3,69
YM	1.077	1.106	1.142	1.189	1.239	1.289
A _b	1.991	2.004	1.991	1.991	1.991	1.991

Çizelge 7.12'den elde edilen değerler, aşağıdaki şekilde grafik olarak verilmiştir. Bu grafiğe bakarak, en uygun akış hızı seçilebilir.



Şekil 7.5 Optimum akış hızı grafiği.

Yukarıda yapılan hesaplamalarda, modül sayısı ondalık sayı olarak ifade edilmişti. Bunun sebebi değişen büyüklüklerin, modül sayısının değişiminden olumsuz etkilenmesini önlemektir. Dolayısıyla yukarıda bulunan modül sayısı, akış hızında yapılacak olan küçük değişimlerle tamsayı olarak ifade edilmelidir. Bulunan modül sayısının, virgülden sonraki ilk rakam 5'ten küçük ise, modül sayısı bir alt değere indirgenecek şekilde yeni hız değerleri belirlenmelidir. Bulunan modül sayısının, virgülden sonraki ilk rakam 5 ve 5'ten büyük ise, modül sayısı bir üst değere getirilecek şekilde yeni hız değerleri belirlenmelidir. Örneğin, modül sayısı 14,6 olarak çıkmış ise modül sayısı 15, 14,2 çıkmış ise modül sayısı 14 olarak atanmalıdır.

Yukarıdaki hesaplamalarda 14,14 çıkan modül sayısı 14 olarak düzeltildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 7.13 Düzeltilmiş modül sayısına göre hesaplanan değerler.

ΔT	1	2	3
N_p	1,48	0,47	0,37
COP_C	5,20	6,30	6,44
YM	10.139	11.068	12.428
$\dot{I}G$	1.880	1.553	1.510
A_b	1867,32	2003,96	2159,37
$n_{modül}$	28,00	14,00	9,00
U_{su}	0,505	0,505	0,523
m	0,30	0,29	0,31
L	66,69	143,14	239,93
ΣL	1867,32	2003,96	2159,37
ΣL_{isoLL}	187,79	208,24	285,03

Yukarıda yapılan hesaplanmalarda, iki boru arasında bırakılacak mesafe 1m olarak alınmıştır. Toprakta olan ısı transferi sonucunda boru etrafındaki belirli bir bölgede sıcaklık etkileşimleri meydana gelir. Isı pompasının çalışma süresince borudan, toprağa ısı geçişi olduğuna göre; bu süre zarfında, boru etrafındaki toprağın sıcaklığı artar. Fakat, belli bir mesafenin dışında, toprak sıcaklığı, toprağın ısı transferinden etkilenmemesi sebebiyle, değişmemektedir. Isı pompası devreden çıktığında ise sıcaklığı artan, etkilenme bölgesi içerisindeki toprak enerjisini ısı transferinden etkilenmeyen bölgedeki toprağa verir. Bunun sonucunda, etkilenmiş toprak sıcaklığı belli bir değere düşerek tekrar sudan ısı çekebilecek hale gelir. Isı pompasının her devreye girdiğinde, toprak sıcaklığının en olumlu durumda, ısı transferinden etkilenmemiş toprak sıcaklığına eşit olması istenir. Yani toprağın sudan çektiği enerjiyi tamamen başka bölgelere aktarması gerekmektedir.

Paralel akışlı sistemlerde, aynı düzlemde birden fazla sayıda boru olduğundan, meydana gelen ısı transferi sonucunda etkilenen toprak bölgesinin doğru olarak belirlenmesinin; sistemin sağlıklı olarak çalışması için büyük önemi vardır. İki boru arasındaki bölgeye her iki borudan da ısı geçişi olduğundan, iki boru arası mesafe aslında oldukça önemli bir kriter olarak karşımıza çıkar. İki boru arasındaki mesafe, eğer yeterli değil ise bu bölgede sıcaklık artışı çok fazla olur ve belli bir noktadan sonra, bu bölgedeki sıcaklık ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığından daha büyük bir değere ulaşarak, sudan ısı çekmek yerine suya ısı vererek sistemin arzulanan su giriş ve çıkış sıcaklıklarında çalışmasına mani olur.

Aşağıda, etkilenmiş toprak bölgesinin tespiti için bir yaklaşım yapılmıştır. Isı transferi radyal yönde olduğundan, sadece bir yönde ki sıcaklık etkileşiminde bulunan toprak bölgesini, “etkilenme yarıçapı” olarak tanımlayalım. İki boru arasında bırakılması gereken mesafenin değerini de etkilenme yarıçapına bağlı olarak ifade edebiliriz.

Fourier’ in ısı iletimi kanununa göre topraktaki sıcaklık dağılımını bulmak amacıyla, birim boyda transfer olan ısı miktarı denklem (4.3) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$q = -k_t \cdot 2\pi \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} \quad (7.24)$$

Sabit yüzey sıcaklığı kabulüne göre birim boyda transfer olan ısı miktarı ise denklem (6.5) ile ifade edilmişti.

$$Q' = k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) \quad (6.5)$$

Denklem (7.24) ile denklem (6.5) birbirine eşitlenir, yarıçap ifadeleri bir tarafta yazılırsa,

$$q = -k_t \cdot 2\pi \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} = k_t \cdot \Delta T \cdot F(z) \quad (7.25)$$

$$-dT = \frac{\Delta T \cdot F(z)}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r} \quad (7.26)$$

Sınır koşullar; $r = r$ iken $T = T_{su}$ ve $r = R_E$ iken $T = T_{top}$ olarak yazılabilir.

$$-\int_{T_{su}}^{T_{top}} dT = \int_r^{R_E} \frac{\Delta T \cdot F(z)}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r} \quad (7.27)$$

$$T_{su} - T_{top} = \frac{\Delta T \cdot F(z)}{2\pi} \cdot \ln \frac{R_E}{r} \quad (7.28)$$

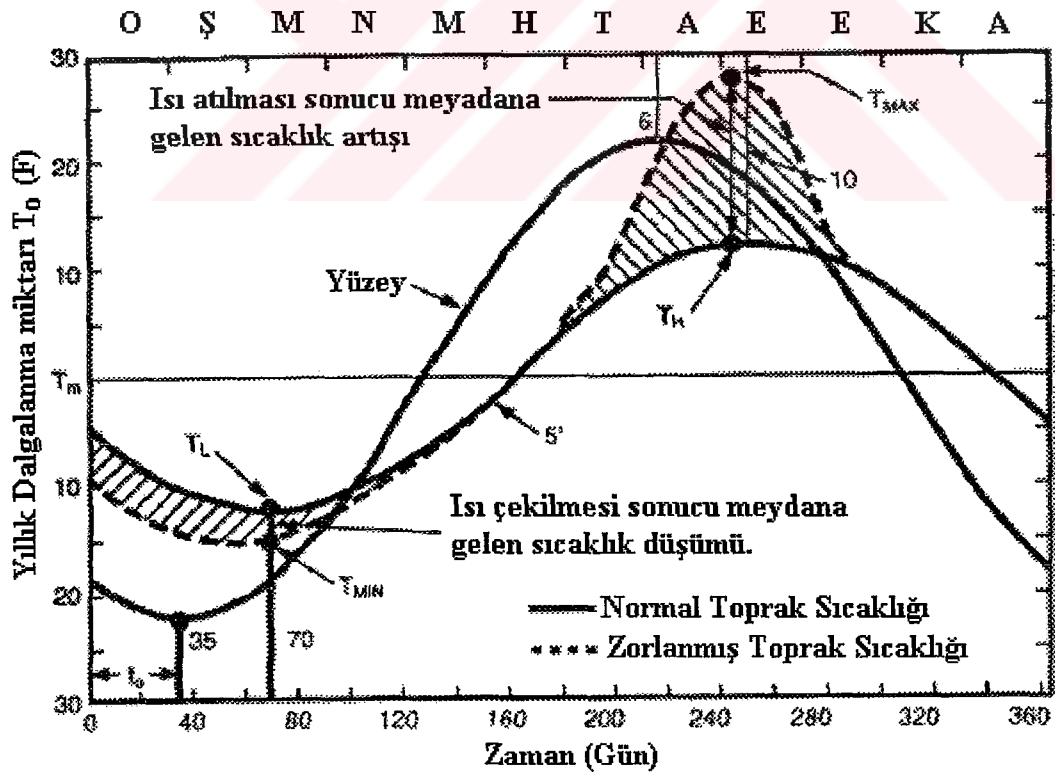
Denklemin sol tarafındaki toprak ile su arasındaki sıcaklık farkı ile, denklemin sol tarafındaki “ ΔT ” ifadesi birbirine eşit olduğundan,

$$\ln \frac{R_E}{r} = \frac{2\pi}{F(z)} \quad (7.29)$$

olarak yazılabilir. Buradan etkilenme yarıçapı R_E çekildiğinde, aşağıdaki ifade bulunur.

$$R_E = r \cdot e^{\frac{2\pi}{F(z)}} \quad (7.30)$$

Daha önce bahsedildiği gibi, sabit yüzey sıcaklığı kabulüne bağlı olarak yapılan hesaplamalarda, ısı pompasının toplam çalışma süresi içerisinde sanki bir defa çalışarak gerekli soğutma ihtiyacını karşılaması, söz konusudur. Fakat gerçekte, her gün için ısı pompası belirli bir süre çalıştıktan sonra, belli bir süre devre dışı kalmaktadır. Bu devre dışında kaldığı süre içerisinde, toprak kazandığı ısıyı daha uzaktaki bölgeye atarak, tekrar ısı çekebilecek konuma gelmeye çalışır. Bu ısının bir kısmını uzaklaştırırsa da, gene üzerinde bir miktar enerji kalır. Aşağıda verilen şekilde, toprağın ısı transferi sonucu, zorlanmış sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. (Miles,1994)



Şekil 7.6 Zorlanmış toprak sıcaklığı grafiği.

Şekil 7.6'dan da görülebileceği gibi, toprak sıcaklığı, kışın ısı çekildiği için düşmekte, yazın ise ısı atıldığı için artmaktadır.

Tezimizde, etkilenme yarıçapı tüm çalışma süresi yerine sadece çalışma süresinin maksimum olduğu temmuz (14gün) ayına göre hesaplanmıştır ve çıkan değer, sistem sürekli olarak günde 24 saat' ten 14 gün çalışmadığı için belirli bir katsayı ile çarpılarak gerçek değer bulunmuştur. Bu katsayı; bir ay içerisinde, ısı pompasının çalışma süresini gösteren, ısı pompasının aylık çalışma oranı olmalıdır.

Dolayısıyla denklem (7.30) aşağıdaki hale dönüşecektir.

$$R_E = f_a \cdot r \cdot e^{\frac{2\pi}{F(z)}} \quad (7.31)$$

Buna göre etkilenme yarıçapını hesaplamak için yapılan hesaplamaların sonuçları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 7.14 Etkilenme yarıçaplarının hesaplanan değerleri.

t	z	F(z)	t _G	Aylar	f _a	R _E	f _a x R _E
48	624,44	1,67	2	MAYIS	0,32	0,58	0,19
144	1873,31	1,46	6	HAZİRAN	0,38	1,00	0,38
336	4371,05	1,34	14	TEMMUZ	0,48	1,50	0,72
288	3746,61	1,36	12	AĞUSTOS	0,48	1,39	0,67
96	1248,87	1,54	4	EYLÜL	0,31	0,82	0,25

Çizelge 7.14'e bakarak, iki boru arasındaki mesafenin 1,5m olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

İki boru arasındaki mesafe yukarıdaki hesaplamalarda, 1m olarak alınmıştır. İki boru arasındaki mesafe,sadece kollektör boyunu ve gerekli olan bahçe alanını arttırmaktadır. Yatırım maliyetindeki artış önemszenmeyecek derecede düşüktür. Bahçe alanının çok büyük değerler alması genelde istenmediğinden, iki boru arası mesafe 1m veya daha altında alınabilir. Fakat bu durumda, topraktaki sıcaklık artışına bağlı olarak artan toprak direncinin, sonlu eleman veya sonlu fark gibi nümerik yöntemlerle belirlenmesi gerekir. Toprak direnci, analitik olarak ise, ayna-görüntü metoduyla birlikte izotermik veya adyabatik yüzey kabulü yapılarak düşük hata oranlarının kabul edilmesi şartıyla bulunabilir. Şu ana kadar bu konu ile ilgili olarak yapılan analitik çalışmalarda genellikle izotermik yüzey kabulü kullanılmıştır. İki boru arasında bırakılması gereken mesafe tezimizde 1,5 m olarak değiştirilmiştir.

Yeni bulunan değere göre hesaplamalar yapıldığında, aşağıdaki çizelgede gösterilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 7.15 Düzeltilmiş etkilene yarıçapına göre hesaplanan değerler.

ΔT	1	2	3
N_p	1,72	0,50	0,37
COP_C	4,99	6,27	6,43
YM	10.398	11.202	12.516
İG	1,911	1,523	1,483
A_b	2800,98	3005,94	3239,06
$n_{modül}$	28,00	14,00	9,00
U_{su}	0,505	0,505	0,523
m	0,295	0,295	0,31
L	66,69	143,14	239,93
ΣL	1867,32	2003,96	2159,37
b	1,50	1,50	1,50
ΣL_{koll}	230,29	229,74	299,03

Buraya kadar yapılan tüm işlemler soğutma sezonundaki ihtiyaçlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Yukarıda tasarlanan sistemin ısıtma sezonundaki performansını inceleyelim. Isıtma sezonunda, binanın saatlik ısı kaybı 21,5kW olduğunu varsayalım. Öncelikle ısıtma sezonunda, bina içi ısı dağıtım sistemi 45/25°C sıcaklık aralıklarında çalıştığından, ısı pompasının kondensasyon sıcaklığı 57°C olarak belirlenmiştir. Kış şartlarında, minimum toprak sıcaklığı 9,53°C olduğundan, yer ısı değiştiricisindeki ısı taşıyıcı akışkanın sıcaklığının bu değerden düşük olması gerekir. Isı pompasının evaporasyon sıcaklığı 0°C olarak seçilmiştir. Bu durumda, ısı pompasının binanın ısıl ihtiyaçlarını karşılaması için, ısı pompası çevriminde, 0,174kg/s kütleli debide soğutucu akışkan kullanması gerekir. Bu durumda ısı pompasının; kondensasyon kapasitesi $Q_{kond}=21,85kW$, evaporasyon kapasitesi $Q_{evap}=17,48kW$ olmaktadır. Gerekli olan kompresör gücü ise, $W_C=4,38kW$ olmaktadır Buna bağlı olarak $COP_H=4,989$ olarak bulunur..

Suyun düşük sıcaklıklardaki yoğunluğu 1000kg/m³ olduğundan, bir modüldeki kütleli debi aşağıdaki değeri alacaktır. Suyun ortalama 6°C' deki özgül ısıtma ısı; suyun termofiziksel

özelliklerini belirten tablolardan, $C_p=4,199\text{kJ/kgK}$ olduğu görülür. Bir modüldeki suyun kütleli debisi aşağıdaki değeri almaktadır.

$$m = \rho \cdot A \cdot u = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot u = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot (1,075 \times 0,0254)^2}{4} \cdot 0,505 = 0,295 \text{ kg/s}$$

Yaz koşullarında, yer ısı değiştiricisinin modül sayısı 14 adet olduğuna göre suyun yer ısı değiştiricisine giriş-çıkış sıcaklıkları farkı;

$$\Delta T = \frac{Q}{n \cdot m \cdot C_p} = \frac{17,48}{14 \cdot 0,295 \cdot 4,199} = 1^\circ\text{C} \text{ olarak bulunur.}$$

Bulunan boru boylarını sağlayan, suyun yer ısı değiştiricisine giriş-çıkış sıcaklıkları $5,4/6,4^\circ\text{C}$ olmaktadır.

Bu koşullar altında yer ısı değiştiricisi hesaplamalarında, yukarıda elde edilen sonuçlardan farklı olarak sirkülasyon pompasının gücü $N_p=0,56\text{kW}$ olarak bulunmuştur. Boru boylarının, boru çapının, yer ısı değiştiricisindeki suyun akış hızının eşit olmasına rağmen, yaz şartlarında hesaplanan pompa gücünün kış şartlarında farklı çıkmasının sebebi; yer ısı değiştiricisinde dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkanın farklı sıcaklık aralıklarında çalışmasına bağlı olarak termofiziksel özelliklerinin farklı değerler almasından kaynaklanır.

Binanın ısı ihtiyaçlarının farklı olması sebebiyle ısı pompası sisteminin çalışma süresi de farklı olacaktır. Topraktaki ısı transferi zamana bağlı olarak değiştiğinden, ısı pompasının çalışma süresinin belirlenmesi gerekeceği yukarıda belirtilmişti. İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı -3°C 'dir. Binamızın ısıtma yükünün $21,5\text{kW}$, bina içindeki mahallerin ortalama sıcaklığı ise 20°C olduğu bilindiğine göre buradan hareketle binanın K_bF değeri;

$$K_bF = \frac{Q_C}{T_d - T_i} = \frac{21,5}{20 - (-3)} = 0,934 \text{ kW/}^\circ\text{C} \text{ olarak bulunur.}$$

Meteoroloji Müdürlüğünden elde edilen, 1999 yılı için ölçülmüş saatlik hava sıcaklıkları ekte verildiğine göre 1999 yılı saatlik dış hava sıcaklıklarına göre ısıtma mevsimindeki sıcaklık gruplarının saatlik frekans dağılımları aşağıdaki çizelgedeki gibidir. Ekteki değerlerin sadece 1999 yılı için geçerli olduğu, uzun yıllar sıcaklık ortalamalarına göre yapılan hesaplamaların daha sağlıklı olduğu vurgulanmalıdır.

Çizelge 7.16 1999 yılında ölçülen kış hava sıcaklıklarının saatlik dağılımları.

Sıcaklık grubu (°C)	Grup orta noktası (°C)	Frekans (h)							
		Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	
-2 - 0	-1	0	0	0	4	3	0	0	
0 - 2	1	0	3	0	18	35	0	0	
2 - 4	3	0	35	2	52	103	14	0	
4 - 6	5	0	51	67	212	112	112	5	
6 - 8	7	0	49	81	164	160	151	33	
8 - 10	9	3	52	97	134	129	173	73	
10 - 12	11	54	141	159	72	70	117	77	
12 - 14	13	95	118	183	67	40	78	132	
14 - 16	15	206	162	124	18	15	58	133	
16 - 18	17	57	80	27	3	2	22	120	

Çizelge 7.16 şöyle yorumlanmalıdır; İstanbul Göztepe’de yıl içinde, ekim ayında 3, kasım ayında 52, aralık ayında 97, ocak ayında 134, şubat ayında ise 129 saat, mart ayında 173, nisan ayında 73 saat, 8 ve 9°C’lik dış hava sıcaklıkları ölçülmüştür.

Bu bilgiler ışığında, aralık metoduyla ısıtma sezonunda aylık olarak elde edilen değerler aşağıda çizelgeler halinde sunulmuştur. Çizelgelerin, I kolonlarındaki ısı pompasının çalışma süreleri toplanarak, ısıtma sezonunda ısı pompası siteminin toplam çalışma süresi bulunabilir.

Çizelge 7.17 Ekim ayı için sistemin sağladığı değerler.

EKİM

Q ₀	21,5	Binaın saatlik ısı kaybı (kW)			T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)					
T _d	-3	İstanbul için dış hava ortalama sıcaklığı (°C)			T _H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)					
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			Q _{cond.}	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)					
T _{ev1}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)			m _g	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)					
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP _H	4,989	Isıtma performans katsayısı					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binaın Karakteristik (K _p F) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binaın Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oramı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Isıtma Saadeti Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binaın Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Topraktan Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _h /(T _i -T _a)	T _i -T _h	B x C	Q _{cond.}	D/E	E/COP _H	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	3	1,41	6,18	31	0,79	23,87
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	54	20,79	91,06	454	11,64	351,60
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	95	28,45	124,60	622	15,93	481,10
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	206	44,07	192,99	963	24,68	745,16
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	57	7,32	32,04	160	4,10	123,71
Toplam							415	102,03	446,87	2229	57,14	1725,44

Isı Pompası Aylık Çalışma Oramı : 0,25

Çizelge 7.18 Kasım ayı için sistemin sağladığı değerler.

KASIM

Q _b	21,5	Binaun saatlik ısı kaybı (kW)			T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)					
T _d	-3	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)			T _H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)					
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			Q _{kond.}	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)					
T _{soğ}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)			m _g	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)					
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP _H	4,989	Isıtma performans katsayısı					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binaun Karakteristik (K _p) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binaun Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Isıtma Saadeti Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binaun Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprakta Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _b /(T _i -T _d)	T _i -T _h	B x C	Q _{kond.}	D/E	E/COP _H	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	3	2,44	10,68	53	1,37	41,24
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	35	25,46	111,48	556	14,25	430,46
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	51	32,73	143,34	715	18,33	553,44
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	49	27,25	119,35	595	15,26	460,84
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	52	24,47	107,17	535	13,70	413,82
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	141	54,29	237,77	1186	30,40	918,07
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	118	35,34	154,77	772	19,79	597,57
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	162	34,65	151,77	757	19,41	586,00
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	80	10,27	44,97	224	5,75	173,63
Toplam							691	246,89	1081,30	5395	138,26	4175,06

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,36

Çizelge 7.19 Aralık ayı için sistemin sağladığı değerler.

ARALIK

Q _b	21,5	Binaınm saatlik ısı kaybı (kW)				T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)				
T _d	-3	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)				T _H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)				
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)				Q _{kond.}	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)				
T _{sal}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)				m _g	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)				
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)				COP _H	4,989	Isıtma performans katsayısı				
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binaınm Karakteristik (K _{1F}) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binaınm Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Isıtma Saatinin Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binaınm Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Topraktaın Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _b /(T _i -T _a)	T _i -T _h	B x C	Q _{kond.}	D/E	E/COP _H	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	2	1,45	6,37	32	0,81	24,60
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	67	43,00	188,31	939	24,08	727,07
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	81	45,05	197,30	984	25,23	761,80
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	97	45,65	199,92	997	25,56	771,93
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	159	61,22	268,12	1338	34,28	1035,27
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	183	54,80	240,02	1197	30,69	926,75
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	124	26,52	116,17	580	14,85	448,54
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	27	3,47	15,18	76	1,94	58,60
Toplam							740	281,16	1231,39	6143	157,45	4754,55

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,38

Çizelge 7.21 Şubat ayı için sistemin sağladığı değerler.

Q _b	21,5	Binaın saatlik ısı kaybı (kW)			T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)					
T _d	-3	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)			T _H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)					
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			Q _{cond.}	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)					
T _{su1}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)			m _R	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)					
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP _H	4,989	İstina performans katsayısı					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binanın Karakteristik (K _p) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binanın Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	İstina Saadeti	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binanın Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprakta Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _b ⁄(T _i -T _d)	T _i -T _h	B x C	Q _{cond.}	D/E	E/COP _H	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	3	2,70	11,80	59	1,51	45,58
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	35	28,45	124,60	622	15,93	481,10
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	103	74,91	328,08	1637	41,95	1266,77
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	112	71,87	314,78	1570	40,25	1215,41
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	160	88,99	389,73	1944	49,83	1504,79
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	129	60,71	265,88	1326	34,00	1026,58
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	70	26,95	118,04	589	15,09	455,78
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	40	11,98	52,46	262	6,71	202,57
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	15	3,21	14,05	70	1,80	54,26
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	2	0,26	1,12	6	0,14	4,34
Toplam							669	370,02	1620,55	8085	207,21	6257,17

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,55

Çizelge 7.22 Mart ayı için sistemin sağladığı değerler.

MART

Q _b	21,5	Binaın saatlik ısı kaybı (kW)			T _L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)		
T _d	-3	İstanbul için dış hava sıcaklığı (°C)			T _H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)		
T _i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			Q _{kond.}	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)		
T _{su1}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)			m _R	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)		
N _p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP _H	4,989	Isıtma performans katsayısı		

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Binaın Karakteristik (K _p) Değeri	Denge Sıcaklığı	Binaın Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Isıtma Saatleri Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Binaın Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Topraktaın Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T _h	Q _b /(T _i -T _d)	T _i -T _h	B x C	Q _{kond.}	D/E	E/COP _H	EK-3	H x F	F x G x H	D x H	N _p x F x H	J x (COP _H -1)-L
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	14	10,18	44,59	222	5,70	172,18
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	112	71,87	314,78	1570	40,25	1215,41
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	151	83,98	367,80	1835	47,03	1420,14
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	173	81,41	356,56	1779	45,59	1376,74
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	117	45,05	197,30	984	25,23	761,80
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	78	23,36	102,30	510	13,08	395,01
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	58	12,41	54,34	271	6,95	209,80
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	22	2,82	12,37	62	1,58	47,75
Toplam							725	331,09	1450,05	7234	185,41	5598,83

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,46

Çizelge 7.23 Nisan ayı için sistemin sağladığı değerler.

NİSAN

Q_b	21,5	Bina ın saatlik ısı kaybı (kW)			T_L	0	Evaporasyon Sıcaklığı (°C)					
T_d	-3	İstanbul için dış hava dizayn sıcaklığı (°C)			T_H	52	Kondensasyon Sıcaklığı (°C)					
T_i	20	Yaşam alanı ortalama sıcaklığı (°C)			$Q_{kond.}$	21,85	Kondenser Kapasitesi (kW)					
T_{ref}	5,9	Suyun evaporatöre giriş sıcaklığı(°C)			m_R	0,174	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)					
N_p	0,56	Pompa gücü (kW)			COP_H	4,989	Isıtma performans katsayısı					
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Dış Hava Sıcaklığı Grup	Bina ın Karakteristik (K_p) Değeri	Denge Sıcaklığı	Bina ın Saatlik Isı Kaybı	Isı Pompası Kapasitesi	Isı Pompasının Çalışma Oranı	Isı Pompasının Saatlik Enerji Tüketimi	Isıtma Saadeti Frekansı	Isı Pompasının Çalışma Süresi	Isı Pompasının Enerji Tüketimi	Bina ın Isı Kaybı	Sirkülasyon Pompasının Enerji Tüketimi	Toprak tan Çekilen Net Isı Miktarı
°C	kW/°C	°C	kW	kW	birimsiz	kW	h	h	kWh	kWh	kWh	kWh
T_h	$Q_b/(T_i-T_d)$	T_i-T_h	$B \times C$	$Q_{kond.}$	D/E	E/COP_H	EK-3	$H \times F$	$F \times G \times H$	$D \times H$	$N_p \times F \times H$	$J \times (COP_H-1)-L$
-1	0,935	21	19,63	21,85	0,8984	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
1	0,935	19	17,76	21,85	0,8129	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	0,935	17	15,89	21,85	0,7273	4,380	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
5	0,935	15	14,02	21,85	0,6417	4,380	5	3,21	14,05	70	1,80	54,26
7	0,935	13	12,15	21,85	0,5562	4,380	33	18,35	80,38	401	10,28	310,36
9	0,935	11	10,28	21,85	0,4706	4,380	73	34,35	150,46	751	19,24	580,94
11	0,935	9	8,41	21,85	0,385	4,380	77	29,65	129,85	648	16,60	501,36
13	0,935	7	6,54	21,85	0,2995	4,380	132	39,53	173,13	864	22,14	668,47
15	0,935	5	4,67	21,85	0,2139	4,380	133	28,45	124,60	622	15,93	481,10
17	0,935	3	2,80	21,85	0,1283	4,380	120	15,40	67,45	337	8,62	260,44
Toplam							573	168,95	739,92	3691	94,61	2856,93

Isı Pompası Aylık Çalışma Oranı : 0,29

Isı pompasının toplam çalışma süresi yukarıda yer alan çizelgelerdeki, I kolonlarında elde edilen değerlerin toplanması ile 80 gün olarak bulunur. Bu çizelgelerden elde edilen bilgilere göre ısı pompası; ekim ayında 4 gün, kasım ayında 10 gün, aralık ayında 12 gün, ocak ayında 17 gün ve şubat ayında 16 gün, mart ayında 14 gün, nisan ayında ise 7 gün olmak üzere toplam 80 gün çalışmıştır.

Bu noktada işletme giderlerini sadece 1 yıl için hesaplayarak sistemin işletme maliyetlerini, diğer sistemlerle karşılama imkanımız olabilir. Faiz oranını $i=0,4$, elektrik fiyatının artış oranı $F_\theta=0,50$, bakım masraflarının elektrik giderlerine oranı $B_a=\%10$; birim elektrik fiyatı $EBF=50000 \text{ TL/kWh}$ olarak almıştık. "C" bugünkü değer faktörü, hesap yapılan yıl veya proje ömrü ve $1 - [(1 + F_\theta)/(1 + i)]$ bağlı olarak ek-4'teki tablodan alınmıştır. Bu veriler ışığında, denklem (7.20)'den faydalananarak bir ısıtma sezonu için işletme giderleri;

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (21,85/4,48) \cdot (1 + 0,1) \cdot (80 \times 24) = 555 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Isıtma sezonunda, sirkülasyon pompasının gücü $N_p=0,56 \text{ kW}$ olarak bulunmuştu. Sistemin hep ısıtma, hem de soğutma sezonunda sağlıklı olarak çalışabilmesi için sirkülasyon pompası ısıtma sezonunda hesaplanan değerlere uygun olacak şekilde seçilmelidir. Dolayısıyla soğutma sezonu için hesaplanan genel performans katsayısı, bu pompa gücü göz önüne alınarak yeniden hesaplanmalıdır. Denklem (7.14)'den faydalananarak;

$$COP_G \frac{Q_{evap}}{W_c + N_m} = \frac{30,143}{4,313 + 0,56} = 6,185 \text{ olarak bulunur.}$$

Bulunan yeni performans katsayısı göz önüne alınarak, denklem (7.20)'den faydalananarak ısı pompası sisteminin bir soğutma sezonu için işletme giderleri ise;

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (30,143/6,185) \cdot (1 + 0,1) \cdot (38 \times 24) = 263 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Dolayısıyla tüm sistemin bir yıllık işletme maliyeti $\dot{I}G=555+263=818$ Milyon TL olarak bulunur.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Toprak sıcaklığının, zaman ve derinliğin fonksiyonu olarak ifade edilmiş, 1m derinlikte İstanbul Göztepe için bulunan sonuçlar, Meteoroloji Müdürlüğü'nce ölçüm sonucu elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda belirtilen yöntem ile bulunan toprak sıcaklıklarında $\pm 1^\circ$ hata payı olduğu belirlenmiştir. Daha derin bölgelerdeki sıcaklık değerleri ise sıcaklık dalgalanmaları daha az olduğundan $\pm 1^\circ$ lik hata oranının daha az olması beklenebilir.

Isı pompasının çalışma süresi BIN (aralık) yöntemine göre hesaplanmış ve ısıtma sezonunda, sistemin 80gün, soğutma sezonunda ise 38 gün çalıştığı belirlenmiştir. Bulunan bu çalışma sürelerine bağlı olarak, toprak kaynaklı ısı pompalarının, işletme ve yatırım maliyetleri hesaplanmış ve hesaplamalar sonucunda, yatırım maliyetlerinin çok büyük bir bölümünün hafriyat masraflarından kaynaklandığı görülmüştür. Hafriyat masraflarının ve dolayısıyla yatırım maliyetinin azaltılması için, bir hendek içerisine düşey olarak birden fazla boru yerleştirmek mümkündür. Bu diziliş sayesinde önemli mali kazançlar elde etmek mümkündür. Boru dizilişi bu şekilde olan bir yer ısı değiştiricisinin dizaynında, borular arasındaki yatay ve düşey mesafeler çok dikkatlice belirlenmeli ve boruların birbirlerine olan ısı etkileşimleri göz önüne alınarak, söz konusu mesafelerin mümkünse sonlu eleman veya sonlu fark gibi bir takım nümerik yöntemler esas alınarak yapılmalıdır. Nümerik hesaplama yapmak mümkün değilse, analitik olarak ayna-görüntü yöntemi kullanılarak bir yaklaşımda bulunulmalıdır.

Yatırım maliyetlerinin, diğer sistemlere nazaran daha pahalı olmasına rağmen, toprak kaynaklı ısı pompaları, yüksek performans katsayıları nedeniyle düşük işletme giderlerine sahiptirler. Binanın ısıtma ihtiyaçlarının doğalgazlı kombi ile karşılanması durumunda bir ısıtma sezonu için işletme gideri aşağıda hesaplanmıştır. Bina ısı kaybı (21,5kW) yaklaşık olarak 18500kcal/h değerindedir. Bakım giderleri toplam işletme maliyetinin %10'u olarak kabul edilmiştir.

$$IG_K = 1,077 \frac{18500kcal/h}{8250kcal/m^3} \cdot (80 \times 24)h \cdot 1,1 \cdot 145100TL/m^3 = 740 \text{ Milyon TL.}$$

Yukarıda, toprak kaynaklı ısı pompasının bir ısıtma sezonundaki işletme gideri 555Milyon TL olarak bulunmuştu. İki sistemin bina içi tesisatının maliyeti birbirine eşit kabul edilebilir. Doğal olarak, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, kombili sisteme göre işletme

giderlerinde elde ettiği 185Milyon TL değerindeki avantajın, yer ısı değiştiricisinin tesisi için harcanan yatırım maliyetini kısa zamanda karşılaması mümkün değildir. Buradan hareketle sadece ısıtma amacıyla sistemin kullanılması ekonomik açıdan makul değildir.

Şimdi de sistemimizi, hava kaynaklı bir ısı pompası ile mukayese edelim. Seçilen hava kaynaklı ısı pompasının, binanın ısıtma ihtiyaçlarını elektrikli ısıtıcı ile karşılaması durumunda, verilen ısıtma yükünün karşılanması için 9,2kW nominal güç girişine ihtiyacı vardır. Bu durumda sistemin bir ısıtma sezonu için işletme giderleri;

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (9,2) \cdot (1 + 0,1) \cdot (80 \times 24) = 1046 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Soğutma mevsiminde ise seçilen cihazın kompresörünün çektiği güç 9,2kW'tür. Bu durumda sistemin bir soğutma sezonu için işletme giderleri;

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (9,2) \cdot (1 + 0,1) \cdot (38 \times 24) = 497 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Sistemin, binanın soğutma ve ısıtma ihtiyaçlarını karşılaması için bir yıllık süre içerisinde 1543Milyon TL işletme gideri gerekmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, hava kaynaklı ısı pompası sistemine göre işletme giderlerinde elde ettiği 725Milyon TL değerindeki avantajın, yer ısı değiştiricisinin tesisi için harcanan yatırım maliyetini proje ömrü olarak belirtilen süre içerisinde rahatlıkla karşılayacağı söylenebilir.

Son olarak seçilen hava kaynaklı ısı pompasının, binanın ısıtma ihtiyaçlarını elektrikli ısıtıcı yerine doğalgaz yakarak karşılaması durumunda sistemin bir ısıtma sezonu için işletme giderlerini inceleyelim. Verilen ısıtma yükünün karşılanması için iç oda ve dış oda fanları için, 1,5kW enerji girişi gerektirirler.

$$\dot{I}G = 1,077 \frac{18500 \text{ kcal} / \text{h}}{8250 \text{ kcal} / \text{m}^3} \cdot (80 \times 24) \text{ h} \cdot 1,1 \cdot 145100 \text{ TL} / \text{m}^3 = 740 \text{ Milyon TL.}$$

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (1,5) \cdot (1 + 0,1) \cdot (80 \times 24) = 170 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Soğutma mevsiminde ise seçilen cihazın çektiği güç 11,7kW'tır. Bu durumda sistemin bir soğutma sezonu için işletme giderleri;

$$\dot{I}G = 1,077 \cdot 50000 \cdot (11,7) \cdot (1 + 0,1) \cdot (38 \times 24) = 632 \text{ Milyon TL olarak bulunur.}$$

Sistemin, binanın soğutma ve ısıtma ihtiyaçlarını karşılaması için bir yıllık süre içerisinde 1542Milyon TL işletme gideri gerekmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, hava kaynaklı ısı pompası sistemine göre işletme giderlerinde elde ettiği 724Milyon TL değerindeki avantajın, yer ısı değiştiricisinin tesisi için harcanan yatırım maliyetini proje ömrü olarak belirtilen süre içerisinde rahatlıkla karşılayacağı söylenebilir.

Aşağıda Federal Technology Alerts firmasının NewYork yakınlarında bir tesisin ısı ihtiyaçlarının karşılanması için önerilen 3 farklı sistemin karşılaştırılması sonucu elde edilen değerler bir çizelge halinde verilmiştir. Derece-gün metodu kullanılarak tesisin ısı kaybı, 970.6kW, ısı kazancı ise 373,4 kW olarak belirlenmiştir.

İlk alternatifte, doğalgaz kazanı ile beraber çalışan bir çatı tipi hava şartlandırma cihazı ele alınmıştır. Dizayn gününde gerekli olan ısıtma ihtiyacının karşılanması için, ısıtma kapasitesi 79,2kW ve soğutma kapasitesi 47,5kW olan 13 adet ünite kullanılmıştır. Her bir ünite 2,5kW'lık bir iç oda fanı ve 2,65kW'lık bir dış oda fanı gerektirmektedir. Bu ekipmanların ömrü 15 yıl olarak belirlenmiştir.

İkinci alternatifte, elektrikli ilave ısıtıcı ile çalışan hava kaynaklı çatı tipi hava şartlandırma cihazı ele alınmıştır. Dizayn gününde gerekli olan ısıtma ihtiyacının karşılanması için, ısıtma kapasitesi 48,7kW ve soğutma kapasitesi 47,5kW olan 7 adet ünite kullanılmıştır. Her bir ünitenin iç oda fanı ve dış oda fanının çektiği güç hesaplamalara dahil edilmiştir. Sistem ilave olarak 125kW'lık elektrikli ısıtıcı ile takviye edilmiştir. Bu ekipmanların ömrü 15 yıl olarak belirlenmiştir.

Üçüncü alternatifte, kapalı çevrimli düşey yer ısı değiştiricileri kullanarak su kaynaklı ısı pompası ele alınmıştır. Dizayn gününde gerekli olan ısıtma ihtiyacının karşılanması için, ısıtma kapasitesi 17,6kW ve soğutma kapasitesi 16,9kW olan 22 adet ünite kullanılmıştır. Her bir ünitenin iç oda fanı ve dış oda fanının çektiği güç hesaplamalara dahil edilmiştir. Her bir ısı pompasının ilave olarak 33kW'lık elektrikli ısıtıcı ile takviye edilmiştir. Enerji Kazancı sağlamak amacıyla değişken devirli sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Bu ekipmanların ömrü 19 yıl olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki çizelgede elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Görüldüğü gibi üçüncü alternatif en avantajlı sonuçları vermektedir.

Çizelge 7.24 Değişik ısı pompası sistemlerinin mukayesesi.

Griffiss AFB, NY	Konvansiyonel Sistem	Hava Kaynaklı Isı Pompası	Toprak Kaynaklı Isı Pompası
Ekipman sayısı	13	7	22
Nominal kapasite:			
Birim (ton)	13.5	13.5	4.8
Toplam (ton)	175.5	94.5	105.6
Ek Isıtıcı Kapasitesi:			
Birim (kW)	Kullanılmıyor	125	33
Toplam (kW)	Kullanılmıyor	875	726
Dizayn koşullarında ekipman kapasiteleri			
Yaz (kBtu/h)	2,535.0	1,360.1	1,270.1
Kış (kBtu/h)	3,510.0	3,395.0	3,336.6
Enerji Tüketimi:			
Elektrik (kWh/yıl)	252,908	1,656,555	1,413,207
İhtiyaç(kW-ay/yıl)	1,481	4,200	4,355
Doğalgaz (therm/yıl)	110,380	0	0
Toplam enerji (MBtu/yıl)	11,901	5,562	4,822
Enerji Maliyetleri:			
Elektrik (\$/yıl)	12,645	82,828	70,660
İhtiyaç (\$/yıl)	8,160	23,142	23,996
Doğalgaz(\$/yıl)	59,605	0	0
Toplam enerji (\$/yıl)	80,411	105,970	94,656
İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$/yıl)	8,775	3,300	3,700
Yatırım Maliyeti (\$)	454,100	212,500	329,300
Ekipman Ömrü (yıl)	15	15	15
Toplam Life-Cycle Maliyeti (\$)	1,639,262	1,516,482	1,502,942

Yukarıdaki hesaplamalar, toprak kaynaklı ısı pompalarının diğer sistemlere nazaran çok düşük bir işletme giderine sahip olduğunu göstermektedir. Ülkemizdeki, enerji sıkıntısı yurt dışından ithal enerji ile karşılanmaya çalışılmaktadır. Türkiye ve enerji sıkıntısı çeken diğer ülkelerde, enerji maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle, yenilebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmeye çalışılması gerekmektedir. Ayrıca bu sistemlerin, çevre kirliliğinin azaltılmasında sağlayacağı fayda da göz ardı edilmemelidir. Bu bağlam da zaten diğer sistemlerden daha az enerji gerektiren toprak kaynaklı ısı pompalarının bir çok avantaja sahip olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Ataman, H. (1985), "Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Tasarımı" İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Babür, N. (1986), "Design and Construction of an Earth Source Heat Pump", ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Ball, D.A., Fischer, R.D ve Hodgett, D.L. (1983), "Design Methods for Ground Source Heat Pumps", ASHRAE Transactions, 89:416-440.
- Carslaw, H.S. ve Jeager, J.C. (1959), Conduction of Heat in Solids, Claderon Press, London.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A.(1996), Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik (Çev.,T. Derbentli), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Dağsöz, A.K. (1990), Isı Geçişi, Alp Teknik Yayınları, İstanbul.
- Edwards, C.H.ve Penney D.E. (1996), Differential Equations and Boundary Value Problems, Prentice Hall International Editions, New Jersey.
- Halıcı, F. ve Gündüz, M. (1998), Örneklerle Isı Geçişi, Nil Matbaacılık, Adapazarı.
- Incompera, F. P. ve DeWitt. D.P. (1990), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York.
- Ingersoll, L. R. ve Plass, H. J. (1955), Heat Conduction with Geological Applications, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kavanaugh, S. (1998), "Development of Design Tools for Ground-Source Heat Pump", ASHRAE Transactions, 104:1932-1937.
- Miles, L. (1994), Heat Pumps Theory and Service, Delmar Publishers Inc. New York.
- Partin, J.R. (1985), "Sizing the Closed-Loop Earth Coupling for Heat Pump" , ASHRAE Transactions, 91:61-69.
- Safemazandarani, P., Edwards, J.A., Johnson, R.R. ve Mohammed-Zadeh, Y. (1990), "Mathematical Modeling of Direct Expansion Ground-Coupled Heat Pump System", ASHRAE Transactions, 96:583-589.
- Stack, O. A. (1998), "Effectiveness of a Municipal Ground-Coupled Reversible Heat Pump System Compared to an Air Source System", ASHRAE Transactions, 104:540-549.
- Martin, S.D. (1990), " A Design Economic Sensitivity Study of Single Pipe Horizontal Ground-Coupled Heat Pump Sytems", ASHRAE Transactions, 104:763-770.

EKLER

- Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı 5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri.
- Ek 2 İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları.
- Ek 3 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları.
- Ek 4 Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri.
- Ek 5 Boru özellikleri ve fiyatları



**Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı
5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri.**

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre 1985 yılı 5cm. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1985)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	6,3	4,2	0,6	7,9	15,6	26,3	27	31,1	26,7	17,1	12,8	7,3
2	6	4,7	1,2	8,9	18	25,8	27,7	31	27,6	18,6	12,4	8,7
3	6,5	6,6	2,2	10,6	19,6	24,6	25,4	29	27,6	19,5	14,8	8,8
4	6,1	3,2	3,6	11,9	17	25,3	21,9	29,2	27,8	19,8	14	10,1
5	7,8	1,1	4,4	12,9	18,5	25,9	24,2	28,9	26,1	20,1	14,4	10,7
6	8,5	3,1	4,8	14	17,1	24,5	26,4	29,9	23,4	21,1	15	10,3
7	9,4	6,4	4,7	14,6	19,2	26,1	25,2	30,4	24,1	19,5	12,2	10,9
8	10,1	5,5	4,5	14,4	21,8	27,7	26,2	28,2	23,9	18,8	11	10,1
9	8,4	4,3	4,4	15,3	19,7	29	27,3	26,9	24,1	18,8	11,2	9
10	7,3	7,4	5,2	17	20,8	27,1	27,3	28,2	22,4	17,8	11,1	9,9
11	3,5	8,2	5,2	18,7	19,8	28,5	27,5	28	21,1	17,3	10,5	10,1
12	2,8	9,5	5,1	17,3	21,8	24,3	26,3	28,4	20,8	14,7	11,7	10
13	3	3,7	5,2	13,1	22,8	25,4	26	28,9	19,1	15,9	12	9,6
14	3,2	1,8	7,4	13,2	23,6	26	26,3	29,9	19,9	16,4	12,9	8,6
15	4	1,3	8,6	13,9	23,9	27,3	27,3	30	19,6	14,9	10,7	7,9
16	3	1	10,4	16	25,2	27,6	27,6	29	20,8	12,7	8,9	7,4
17	2,4	0,8	10,9	14,9	23,7	28,5	27,9	29,1	21,7	11,2	10,4	9
18	4,7	0,8	11,8	12,8	23,5	26,1	28,1	28,6	21,3	11,7	10,5	7,9
19	6,3	0,5	11,8	14,4	24,9	24,4	28,4	29,5	22	12,2	11,5	4,6
20	6,8	0,6	9	13,7	23	24,6	28,7	29,6	20,6	11,9	11	4,8
21	6,3	0,5	8,3	12,3	23,9	27	29,5	27,7	21,6	12,6	11,8	4,3
22	6,1	0,5	8,7	11,5	28,8	24,8	29,2	27,8	22,3	13,2	11,8	5,3
23	5,9	0,3	7,7	14,7	26,3	26,7	29	28,1	21,8	13	11,9	7,3
24	7,9	0,4	7,2	17,3	26,3	26,9	28,6	28,5	21,9	11,7	12,1	8
25	8,5	0,4	8,1	16,9	25,2	25,7	27,4	29,1	22,8	10,8	12,4	6,6
26	7,4	0,4	9,3	18,5	24,2	26,4	28,2	28,7	22,1	10,1	12,2	7,5
27	8,5	0,9	9,6	19,2	24,4	27,2	28,8	29,2	21,4	11,8	12,4	9,1
28	9,3	1,3	10,6	19,8	23,4	27,6	29,1	29,1	19,9	10,7	10,6	9,1
29	7		11,1	18,7	24,4	27,3	29,6	28,9	19,1	11,1	10,5	8,1
30	5,2		8,9	14,1	25,4	27,3	30,6	29,1	17,1	11	7,5	10,5
31	4,7		7,7		25,9		30,9	28,5		11,6		10,7
Ort.:	6,2	2,8	7,0	14,6	22,5	26,4	27,5	29,0	22,4	14,8	11,7	8,5

**Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı
5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri. (Devam)**

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre 1985 yılı 1m. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1985)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	11,8	10,2	7,7	9,8	13,3	17,6	20,1	21,9	22,7	21	15,8	14,2
2	11,4	10,2	7,6	9,8	13,4	17,8	20,2	22	22,8	20,9	15,9	14
3	11,7	10,1	7,5	9,8	13,4	18	20,3	22,1	22,7	20,7	15,7	13,6
4	11,6	10	7,4	9,8	13,5	18,1	20,3	22,2	22,7	20,6	15,8	13,6
5	11,5	9,9	7,4	9,9	13,6	18,2	20,4	22,3	22,7	20,5	15,8	13,5
6	11,4	9,8	7,4	10,1	13,7	18,2	20,4	22,2	22,7	20,4	15,8	13,3
7	11,3	9,7	7,4	10,2	13,8	18,3	20,4	22,3	22,7	20,4	15,7	13,2
8	11,3	9,6	7,4	10,3	13,8	18,4	20,4	22,3	22,6	20,4	15,7	13,3
9	11,3	9,5	7,5	10,4	14	18,5	20,4	22,5	22,5	20,6	15,7	13,3
10	11,3	9,5	7,6	10,6	14,1	18,6	20,3	22,5	22,6	20,5	15,2	13,2
11	11,3	9,4	7,7	10,9	14,2	18,8	20,3	22,5	22,4	20,1	15,5	13,2
12	11,3	9,4	7,8	11,1	14,4	19	20,5	22,4	22,2	20	15,4	13,3
13	11,2	9,5	7,9	11,3	14,6	19,1	20,6	22,4	22	18,9	15,2	13,3
14	8,6	9,6	7,9	11,5	14,7	19,2	20,6	22,5	21,8	19,6	15,2	13,2
15	10,8	9,6	8	11,8	14,9	19,2	20,7	22,6	21,7	18,4	15,2	13,1
16	10,6	9,6	8	11,9	15,1	19,2	20,7	22,6	21,5	18,4	15,1	13
17	10,4	9,4	8,2	11,9	15,3	19,3	20,7	22,5	21,3	19	15	12,8
18	10,3	9,2	8,4	12	15,6	19,3	20,8	22,6	21,3	18,6	14,9	12,7
19	10,1	9	8	12,1	15,8	19,4	21	22,7	21,2	18,2	14,7	12,7
20	10,1	8,9	8,8	12,2	15,9	19,4	21,1	22,6	21,3	18,1	14,6	12,5
21	9,9	8,7	9	12,2	16	19,6	21,3	22,7	21,2	17,7	14,5	12,4
22	9,9	8,6	9,2	12,2	16,2	19,6	21,4	22,6	21,2	17,5	14,5	12,1
23	9,9	8,4	9,3	12,3	16,4	19,6	21,4	22,7	21,2	17,4	14,5	12,1
24	9,9	8,2	9,4	12,3	16,6	19,7	21,5	22,6	21,1	17,2	14,4	11,7
25	10	8,1	9,4	12,4	16,7	19,7	21,6	22,7	21,2	17,2	14,4	11,6
26	10	8,1	9,4	12,4	17	19,6	21,6	22,6	21,1	17	14,4	11,5
27	10,1	8	9,5	12,5	17,1	19,7	21,6	22,7	21,1	16,8	14,5	11,5
28	10,2	7,8	9,6	12,7	17,2	19,8	21,7	22,7	21	16,6	14,4	11,5
29	10,2		9,6	12,8	17,3	19,9	21,7	22,7	20,8	16,4	14,2	11,3
30	10,2		9,6	13	17,4	20	21,7	22,8	20,9	16,3	14,2	11,3
31	10,2		9,7		17,5		21,8	22,8		16,1		11,3
Ort.:	10,6	9,2	8,4	11,4	15,2	19,0	20,9	22,5	21,8	18,8	15,1	12,7

**Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı
5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri. (Devam)**

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre 1999 yılı 5cm. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1999)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	6,3	4,4	9,3	9,6	21,1	25,8	28,3	26,9	26	22,8	13,5	6,5
2	6,4	3,1	10,2	11,3	23,6	20,5	28,2	28,3	23,7	23	13,7	7,4
3	6,7	3,4	11,3	12,6	22,1	21,9	28,5	28,7	24,1	23	13,9	9,3
4	7,4	3,9	11,4	11,2	22,2	22,6	28,9	28,7	25,2	23	13,5	8,1
5	6,8	5,1	12,9	12,4	20,9	21,7	29	28,4	23,5	22,7	13,9	9,1
6	5,9	6,2	13,8	11,9	14,9	22	28,8	28,7	22,1	23,5	12,9	9,7
7	5,9	3,3	14	12,9	15	23,6	29,3	29	21,6	23,2	13,2	8,9
8	6,5	5,3	13,6	14,9	16,2	24,4	30,1	29,5	21	18,3	13,2	8,3
9	8,2	5,7	11,2	15,6	17,8	25	30,7	28,7	22,9	16,5	13,3	9,7
10	8,6	6,9	10,4	17,6	18,6	23,6	31	30,6	22,4	17,2	10,8	8,6
11	9,2	10,7	11,2	16	19,3	26,1	31	29,5	22,9	16,7	10,5	9,4
12	9,5	7,9	11,7	16,7	20,6	26,4	29,5	31,3	22,9	17,4	10,4	10,6
13	10,3	8	11,8	17,2	21,5	26,3	28,8	32,3	20,9	18,4	11,1	9,9
14	9	7,2	8,8	13,9	21,9	27	28,9	30,7	22,1	19	10,5	9,3
15	8	8,4	7,1	16,1	24,4	27,5	29,3	29,6	22,7	16,9	12	9,1
16	7,1	7,6	6,9	17	24,5	27,4	27,3	29,7	22,9	16,3	11,6	11,5
17	5,9	7,2	7,6	17,1	20	27,6	27,7	30,5	20,9	15,3	12,4	11,5
18	5,1	8	7,8	19,6	21,3	27,9	26	30,3	22,7	15,3	13,5	10,2
19	5,6	2,8	8,3	18,5	19,1	27,2	27	31,3	23,7	13,8	13,6	9,4
20	5,1	4,4	6,3	18,6	20,5	27,9	28,2	31,4	22,3	15,9	13,2	9,8
21	6,4	7,7	6,9	15,5	23,1	28,9	28,8	31,4	20,6	15,3	14,1	9,7
22	5,8	8,8	8,9	16,1	25	30,6	29,5	31,6	21,9	15,2	15,3	6,8
23	5,9	10,1	10,5	17,8	24,2	26,5	29,9	28,3	22,6	14,6	14,4	5,3
24	4,6	6,3	12,4	19	22,5	21,2	30,4	22,8	22,3	15,8	9,2	5,8
25	4,9	7,2	11,2	18,8	21,9	19,9	31,1	21,5	22,1	16,8	6,9	6,8
26	4,7	7	11,5	18,5	22,8	19,4	31,9	23,2	23,1	15,9	5	7,4
27	4,8	7,8	12,2	19,2	24,1	22,2	31	20,3	23,3	17	5,7	10,2
28	7,5	8,3	11,7	18,1	24,4	25,1	30,3	20,8	23,3	15,5	6	10,4
29	8,3		10,8	18,6	24,7	26,1	30,8	22,6	23,5	14,4	6,8	11
30	6,5		10,3	19,7	23,5	28,4	30,2	24	22,7	13,5	6,9	10,8
31	3,3		9,9		25,1		25,9	25,1		13,2		9,6
Ort.:	6,7	6,5	10,4	16,1	21,5	25,0	29,2	27,9	22,7	17,6	11,4	9,0

Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı 5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri. (Devam)

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre 1999 yılı 1m. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1999)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	10,5	9,5	9,3	10,9	14,8	18,2	20,5	23,8	23	21,6	18,1	14
2	10,5	9,3	9,3	10,9	15	18,3	20,7	23,7	23	21,7	17,9	13,7
3	10,5	9,3	9,5	10,9	15,2	18,4	20,7	23,6	23,1	21,6	17,7	13,8
4	10,4	9,2	9,6	10,8	15,5	18,4	20,6	23,7	23	21,7	17,6	13,4
5	10,4	9	9,7	11,1	15,7	18,4	21,3	23,8	23	21,7	17,4	13,3
6	10,4	8,9	9,7	11,2	16	18,5	21,4	23,8	22,8	21,6	17,4	13,3
7	10,4	8,7	10	11,2	16,1	18,4	21,6	23,8	22,8	21,6	17,4	13,2
8	10,4	8,7	10,3	11,2	15,8	18,5	21,6	23,8	22,6	21,5	17,4	13,1
9	10,4	8,4	10,5	11,4	15,8	18,5	21,8	23,8	22,6	21,5	15,2	13,6
10	10,3	8,5	10,7	11,5	15,7	18,7	22,2	24	22,4	21,4	17	13
11	10,3	8,6	10,7	11,8	15,7	18,8	22,4	24	22,3	21,1	16,9	12,9
12	10,2	8,7	10,8	12,1	15,7	18,9	22,4	24	22,2	21	16,7	13
13	10,5	8,8	10,9	12,3	15,7	19	22,7	24,3	22,2	20,8	16,5	13
14	10,6	9	10,9	12,4	15,8	19,2	22,8	24,4	22,2	20,5	16,4	13
15	10,6	9,1	11	12,7	16	19,4	22,9	24,4	22,1	20,4	16,2	13
16	10,7	9,2	10,9	12,7	16,3	19,6	22,8	24,5	22	20,3	15,8	12,9
17	10,7	9,3	10,7	12,8	16,4	19,6	22,9	24,6	21,9	20,1	16	12,9
18	10,6	9,3	10,6	13	16,6	19,9	22,8	24,6	21,9	20	15,9	12,8
19	10,5	9,4	10,5	13,2	16,8	20,1	22,8	24,6	21,8	19,7	15,7	12,9
20	10,4	9,2	10,4	13,4	16,8	20,2	22,7	24,6	21,9	18,4	15,8	12,9
21	10,2	9,1	10,3	13,6	16,7	20,4	22,9	24,7	21,8	19,3	15,7	12,9
22	10,3	9	10,3	13,6	16,7	20,6	22,9	24,8	21,8	19,2	15,6	12,8
23	10,2	9	10,2	13,8	16,9	20,8	22,7	24,9	21,7	19,1	15,7	12,6
24	10	9,1	10,2	14	17,2	20,9	22,9	24,7	21,7	18,9	15,7	12,3
25	10	9,3	10,3	14	17,3	21	23,4	24,8	21,7	18,8	15,7	12,2
26	9,8	9,4	10,4	14,2	17,4	20,8	23,4	24,6	21,7	18,8	15,5	12
27	9,8	9,3	10,5	14,4	17,5	20,6	23,4	24,2	21,6	18,6	15,3	11,9
28	9,6	9,3	10,6	14,5	17,5	20,6	23,6	23,7	21,6	18,5	14,9	11,8
29	9,6		10,7	14,6	17,5	20,5	23,7	23,6	21,6	18,5	13,9	11,8
30	9,6		10,8	14,7	17,8	20,3	23,8	23,4	21,6	18,4	14,1	11,8
31	9,6		10,8		18		23,8	23,2		18,3		12
Ort.:	10,3	9,1	10,4	12,6	16,4	19,5	22,5	24,1	22,2	20,1	16,2	12,8

Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı 5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri. (Devam)

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre ortalama 5cm. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1999 ve 1985)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	6,3	4,3	4,95	8,75	18,35	26,05	27,65	29	26,35	19,95	13,15	6,9
2	6,2	3,9	5,7	10,1	20,8	23,15	27,95	29,65	25,65	20,8	13,05	8,05
3	6,6	5	6,75	11,6	20,85	23,25	26,95	28,85	25,85	21,25	14,35	9,05
4	6,75	3,55	7,5	11,55	19,6	23,95	25,4	28,95	26,5	21,4	13,75	9,1
5	7,3	3,1	8,65	12,65	19,7	23,8	26,6	28,65	24,8	21,4	14,15	9,9
6	7,2	4,65	9,3	12,95	16	23,25	27,6	29,3	22,75	22,3	13,95	10
7	7,65	4,85	9,35	13,75	17,1	24,85	27,25	29,7	22,85	21,35	12,7	9,9
8	8,3	5,4	9,05	14,65	19	26,05	28,15	28,85	22,45	18,55	12,1	9,2
9	8,3	5	7,8	15,45	18,75	27	29	27,8	23,5	17,65	12,25	9,35
10	7,95	7,15	7,8	17,3	19,7	25,35	29,15	29,4	22,4	17,5	10,95	9,25
11	6,35	9,45	8,2	17,35	19,55	27,3	29,25	28,75	22	17	10,5	9,75
12	6,15	8,7	8,4	17	21,2	25,35	27,9	29,85	21,85	16,05	11,05	10,3
13	6,65	5,85	8,5	15,15	22,15	25,85	27,4	30,6	20	17,15	11,55	9,75
14	6,1	4,5	8,1	13,55	22,75	26,5	27,6	30,3	21	17,7	11,7	8,95
15	6	4,85	7,85	15	24,15	27,4	28,3	29,8	21,15	15,9	11,35	8,5
16	5,05	4,3	8,65	16,5	24,85	27,5	27,45	29,35	21,85	14,5	10,25	9,45
17	4,15	4	9,25	16	21,85	28,05	27,8	29,8	21,3	13,25	11,4	10,25
18	4,9	4,4	9,8	16,2	22,4	27	27,05	29,45	22	13,5	12	9,05
19	5,95	1,65	10,05	16,45	22	25,8	27,7	30,4	22,85	13	12,55	7
20	5,95	2,5	7,65	16,15	21,75	26,25	28,45	30,5	21,45	13,9	12,1	7,3
21	6,35	4,1	7,6	13,9	23,5	27,95	29,15	29,55	21,1	13,95	12,95	7
22	5,95	4,65	8,8	13,8	26,9	27,7	29,35	29,7	22,1	14,2	13,55	6,05
23	5,9	5,2	9,1	16,25	25,25	26,6	29,45	28,2	22,2	13,8	13,15	6,3
24	6,25	3,35	9,8	18,15	24,4	24,05	29,5	25,65	22,1	13,75	10,65	6,9
25	6,7	3,8	9,65	17,85	23,55	22,8	29,25	25,3	22,45	13,8	9,65	6,7
26	6,05	3,7	10,4	18,5	23,5	22,9	30,05	25,95	22,6	13	8,6	7,45
27	6,65	4,35	10,9	19,2	24,25	24,7	29,9	24,75	22,35	14,4	9,05	9,65
28	8,4	4,8	11,15	18,95	23,9	26,35	29,7	24,95	21,6	13,1	8,3	9,75
29	7,65		10,95	18,65	24,55	26,7	30,2	25,75	21,3	12,75	8,65	9,55
30	5,85		9,6	16,9	24,45	27,85	30,4	26,55	19,9	12,25	7,2	10,65
31	4		8,8		25,5		28,4	26,8		12,4		10,15
Ort.:	6,4	4,7	8,7	15,3	22,0	25,7	28,4	28,5	22,5	16,2	11,6	8,7

**Ek 1 İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü Verilerine göre 1985 ve 1999 Yılı
5cm ve 1m Derinlikte Ölçülen Toprak Sıcaklıklarının Aylık Değerleri. (Devam)**

İstanbul-Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü verilerine göre ortalama 1m. derinlikteki toprak sıcaklıkları:												
(Kaynak: Meteoroloji Müdürlüğü verileri -1999 ve 1985)												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1	11,15	9,85	8,5	10,35	14,05	17,9	20,3	22,85	22,85	21,3	16,95	14,1
2	10,95	9,75	8,45	10,35	14,2	18,05	20,45	22,85	22,9	21,3	16,9	13,85
3	11,1	9,7	8,5	10,35	14,3	18,2	20,5	22,85	22,9	21,15	16,7	13,7
4	11	9,6	8,5	10,3	14,5	18,25	20,45	22,95	22,85	21,15	16,7	13,5
5	10,95	9,45	8,55	10,5	14,65	18,3	20,85	23,05	22,85	21,1	16,6	13,4
6	10,9	9,35	8,55	10,65	14,85	18,35	20,9	23	22,75	21	16,6	13,3
7	10,85	9,2	8,7	10,7	14,95	18,35	21	23,05	22,75	21	16,55	13,2
8	10,85	9,15	8,85	10,75	14,8	18,45	21	23,05	22,6	20,95	16,55	13,2
9	10,85	8,95	9	10,9	14,9	18,5	21,1	23,15	22,55	21,05	15,45	13,45
10	10,8	9	9,15	11,05	14,9	18,65	21,25	23,25	22,5	20,95	16,1	13,1
11	10,8	9	9,2	11,35	14,95	18,8	21,35	23,25	22,35	20,6	16,2	13,05
12	10,75	9,05	9,3	11,6	15,05	18,95	21,45	23,2	22,2	20,5	16,05	13,15
13	10,85	9,15	9,4	11,8	15,15	19,05	21,65	23,35	22,1	19,85	15,85	13,15
14	9,6	9,3	9,4	11,95	15,25	19,2	21,7	23,45	22	20,05	15,8	13,1
15	10,7	9,35	9,5	12,25	15,45	19,3	21,8	23,5	21,9	19,4	15,7	13,05
16	10,65	9,4	9,45	12,3	15,7	19,4	21,75	23,55	21,75	19,35	15,45	12,95
17	10,55	9,35	9,45	12,35	15,85	19,45	21,8	23,55	21,6	19,55	15,5	12,85
18	10,45	9,25	9,5	12,5	16,1	19,6	21,8	23,6	21,6	19,3	15,4	12,75
19	10,3	9,2	9,25	12,65	16,3	19,75	21,9	23,65	21,5	18,95	15,2	12,8
20	10,25	9,05	9,6	12,8	16,35	19,8	21,9	23,6	21,6	18,25	15,2	12,7
21	10,05	8,9	9,65	12,9	16,35	20	22,1	23,7	21,5	18,5	15,1	12,65
22	10,1	8,8	9,75	12,9	16,45	20,1	22,15	23,7	21,5	18,35	15,05	12,45
23	10,05	8,7	9,75	13,05	16,65	20,2	22,05	23,8	21,45	18,25	15,1	12,35
24	9,95	8,65	9,8	13,15	16,9	20,3	22,2	23,65	21,4	18,05	15,05	12
25	10	8,7	9,85	13,2	17	20,35	22,5	23,75	21,45	18	15,05	11,9
26	9,9	8,75	9,9	13,3	17,2	20,2	22,5	23,6	21,4	17,9	14,95	11,75
27	9,95	8,65	10	13,45	17,3	20,15	22,5	23,45	21,35	17,7	14,9	11,7
28	9,9	8,55	10,1	13,6	17,35	20,2	22,65	23,2	21,3	17,55	14,65	11,65
29	9,9		10,15	13,7	17,4	20,2	22,7	23,15	21,2	17,45	14,05	11,55
30	9,9		10,2	13,85	17,6	20,15	22,75	23,1	21,25	17,35	14,15	11,55
31	9,9		10,25		17,75		22,8	23		17,2		11,65
Ort.:	10,4	9,1	9,4	12,0	15,8	19,3	21,7	23,3	22,0	19,5	15,7	12,8

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları.

Ocak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	10,7	10,6	10,5	10,4	10,4	10,3	10,2	10,1	10,1	10,0	9,9	9,9	9,8	9,7	9,7
110	11,1	11,0	10,9	10,8	10,7	10,7	10,6	10,5	10,4	10,4	10,3	10,2	10,2	10,1	10,0
120	11,4	11,3	11,2	11,2	11,1	11,0	10,9	10,9	10,8	10,7	10,6	10,6	10,5	10,4	10,4
130	11,8	11,7	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,2	11,1	11,1	11,0	10,9	10,9	10,8	10,7
140	12,1	12,0	11,9	11,9	11,8	11,7	11,6	11,5	11,5	11,4	11,3	11,3	11,2	11,1	11,1
150	12,4	12,3	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,9	11,8	11,7	11,7	11,6	11,5	11,4	11,4
160	12,7	12,6	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	11,9	11,8	11,8	11,7
170	13,0	12,9	12,9	12,8	12,7	12,6	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3	12,2	12,1	12,1	12,0
180	13,3	13,2	13,1	13,1	13,0	12,9	12,8	12,8	12,7	12,6	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3
190	13,6	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,0	13,0	12,9	12,8	12,8	12,7	12,6	12,6
200	13,8	13,7	13,7	13,6	13,5	13,4	13,4	13,3	13,2	13,2	13,1	13,0	13,0	12,9	12,8
225	14,4	14,3	14,2	14,2	14,1	14,0	14,0	13,9	13,8	13,8	13,7	13,6	13,6	13,5	13,4
250	14,9	14,8	14,8	14,7	14,6	14,6	14,5	14,4	14,4	14,3	14,2	14,2	14,1	14,0	14,0
275	15,3	15,3	15,2	15,1	15,1	15,0	14,9	14,9	14,8	14,8	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5
300	15,7	15,6	15,6	15,5	15,5	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,1	15,1	15,0	15,0	14,9
350	16,2	16,2	16,1	16,1	16,0	16,0	15,9	15,9	15,9	15,8	15,8	15,7	15,7	15,6	15,6
400	16,6	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,2	16,2	16,2	16,1	16,1	16,1

Ocak	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	9,6	9,6	9,5	9,4	9,4	9,3	9,3	9,2	9,2	9,2	9,1	9,1	9,0	9,0	9,0	9,0
110	10,0	9,9	9,9	9,8	9,7	9,7	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,4	9,4	9,3	9,3	9,3
120	10,3	10,3	10,2	10,1	10,1	10,0	10,0	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7	9,6	9,6
130	10,7	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	10,3	10,3	10,2	10,2	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	9,9
140	11,0	10,9	10,9	10,8	10,8	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	10,3	10,3	10,3	10,2
150	11,3	11,3	11,2	11,1	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6	10,5
160	11,6	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3	11,2	11,2	11,1	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,8
170	11,9	11,9	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3	11,2	11,2	11,1	11,1
180	12,2	12,2	12,1	12,0	12,0	11,9	11,8	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4
190	12,5	12,4	12,4	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,8	11,8	11,7	11,7	11,6
200	12,8	12,7	12,6	12,6	12,5	12,5	12,4	12,3	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9
225	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,1	13,0	13,0	12,9	12,8	12,8	12,7	12,7	12,6	12,6	12,5
250	13,9	13,9	13,8	13,7	13,7	13,6	13,6	13,5	13,5	13,4	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,1
275	14,4	14,4	14,3	14,2	14,2	14,1	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,8	13,8	13,7	13,7	13,6
300	14,8	14,8	14,7	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3	14,3	14,2	14,2	14,1	14,1
350	15,5	15,5	15,4	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,2	15,1	15,1	15,0	15,0	14,9	14,9	14,8
400	16,0	16,0	15,9	15,9	15,9	15,8	15,8	15,7	15,7	15,7	15,6	15,6	15,5	15,5	15,5	15,4

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Şubat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
100	8,9	8,9	8,9	8,9	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
110	9,2	9,2	9,2	9,2	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,0	9,0	9,0	9,0
120	9,6	9,5	9,5	9,5	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
130	9,9	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7	9,7	9,7	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
140	10,2	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	9,9	9,9	9,9	9,9	9,8	9,8
150	10,5	10,4	10,4	10,4	10,3	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1
160	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4
170	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6
180	11,3	11,3	11,2	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	11,0	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9
190	11,6	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,2	11,2	11,2	11,1	11,1
200	11,9	11,8	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,6	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,4
225	12,5	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	11,9
250	13,0	13,0	13,0	12,9	12,9	12,8	12,8	12,7	12,7	12,6	12,6	12,6	12,5	12,5
275	13,6	13,5	13,5	13,4	13,4	13,3	13,3	13,2	13,2	13,2	13,1	13,1	13,0	13,0
300	14,0	14,0	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8	13,7	13,7	13,6	13,6	13,5	13,5	13,5
350	14,8	14,8	14,7	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3
400	15,4	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,2	15,1	15,1	15,1	15,0	15,0	15,0	14,9

Şubat	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
100	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9	8,9	8,9	8,9	9,0
110	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,2
120	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,4	9,4
130	9,6	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,6
140	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
150	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
160	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
170	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
180	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6
190	11,1	11,1	11,0	11,0	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,8
200	11,3	11,3	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
225	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8	11,8	11,7	11,7	11,7	11,7	11,6	11,6	11,6	11,6
250	12,4	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,1	12,1
275	13,0	12,9	12,9	12,8	12,8	12,8	12,7	12,7	12,7	12,7	12,6	12,6	12,6	12,5
300	13,4	13,4	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	13,2	13,1	13,1	13,1	13,0	13,0	13,0
350	14,2	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8
400	14,9	14,8	14,8	14,8	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5

Mart	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	9,0	9,0	9,1	9,1	9,1	9,2	9,2	9,3	9,3	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,6
110	9,2	9,2	9,3	9,3	9,3	9,4	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,6	9,6	9,7	9,8
120	9,4	9,4	9,4	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,7	9,8	9,8	9,9
130	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,7	9,7	9,8	9,8	9,8	9,8	9,9	9,9	10,0	10,0
140	9,8	9,8	9,8	9,8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0	10,0	10,1	10,1
150	10,0	10,0	10,0	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2	10,2	10,3
160	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,4	10,4	10,4
170	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6
180	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
190	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9
200	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
225	11,6	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
250	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
275	12,5	12,5	12,5	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
300	13,0	12,9	12,9	12,9	12,9	12,8	12,8	12,8	12,8	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
350	13,8	13,7	13,7	13,7	13,6	13,6	13,6	13,6	13,5	13,5	13,5	13,5	13,4	13,4	13,4
400	14,4	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1

Mart	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	9,7	9,8	9,8	9,9	10,0	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,6	10,7	10,8
110	9,8	9,9	9,9	10,0	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,7	10,7	10,8
120	9,9	10,0	10,0	10,1	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,6	10,7	10,8	10,8
130	10,0	10,1	10,1	10,2	10,2	10,3	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,6	10,7	10,7	10,8	10,9
140	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	10,4	10,4	10,5	10,5	10,6	10,6	10,7	10,7	10,8	10,9	10,9
150	10,3	10,3	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,7	10,7	10,8	10,8	10,9	10,9	11,0
160	10,5	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,6	10,7	10,7	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9	11,0	11,0
170	10,6	10,6	10,6	10,7	10,7	10,7	10,8	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9	11,0	11,0	11,1	11,1
180	10,7	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9	10,9	11,0	11,0	11,0	11,1	11,1	11,2	11,2
190	10,9	10,9	10,9	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,1	11,1	11,1	11,2	11,2	11,2	11,3	11,3
200	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,3	11,3	11,3	11,4	11,4
225	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7
250	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
275	12,3	12,3	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
300	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
350	13,4	13,4	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
400	14,0	14,0	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8

Nisan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	10,9	11,0	11,1	11,2	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2
110	10,9	11,0	11,1	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2
120	10,9	11,0	11,1	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,1
130	10,9	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4	11,5	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	11,9	12,0
140	11,0	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4	11,5	11,5	11,6	11,7	11,8	11,8	11,9	12,0
150	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,3	11,4	11,5	11,5	11,6	11,7	11,7	11,8	11,9	12,0
160	11,1	11,1	11,2	11,3	11,3	11,4	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,9	12,0
170	11,2	11,2	11,3	11,3	11,4	11,4	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,8	11,9	12,0
180	11,2	11,3	11,3	11,4	11,4	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,8	11,9	12,0
190	11,3	11,4	11,4	11,4	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,8	11,9	11,9	12,0
200	11,4	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,8	11,9	11,9	12,0	12,0
225	11,7	11,7	11,7	11,8	11,8	11,8	11,8	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1
250	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,2	12,2	12,2	12,2	12,3
275	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,5
300	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,7	12,7
350	13,2	13,2	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1
400	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6

[illegible]

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Mayıs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	14,0	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,4	15,5	15,6	15,7
110	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,4	15,5
120	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2
130	13,5	13,6	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0
140	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8
150	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6
160	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5
170	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,1	14,2	14,3
180	13,1	13,1	13,2	13,3	13,4	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	13,9	14,0	14,1	14,2
190	13,0	13,1	13,1	13,2	13,3	13,4	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9	14,0	14,1
200	13,0	13,0	13,1	13,2	13,2	13,3	13,4	13,4	13,5	13,6	13,7	13,7	13,8	13,9	14,0
225	12,9	13,0	13,0	13,1	13,1	13,2	13,2	13,3	13,4	13,4	13,5	13,6	13,6	13,7	13,8
250	12,9	12,9	13,0	13,0	13,1	13,1	13,2	13,2	13,3	13,3	13,4	13,5	13,5	13,6	13,6
275	12,9	13,0	13,0	13,1	13,1	13,1	13,2	13,2	13,3	13,3	13,4	13,4	13,5	13,5	13,5
300	13,0	13,1	13,1	13,1	13,2	13,2	13,2	13,3	13,3	13,3	13,4	13,4	13,4	13,5	13,5
350	13,3	13,3	13,3	13,3	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,6
400	13,6	13,6	13,6	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,8	13,8	13,8

Mayıs	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,7
110	15,6	15,7	15,8	15,9	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,8	16,9	17,0	17,1	17,2	17,3
120	15,3	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	17,0
130	15,1	15,2	15,3	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,8
140	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5
150	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2
160	14,6	14,7	14,8	14,9	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0
170	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8
180	14,3	14,4	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6
190	14,2	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,7	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,2	15,3	15,4
200	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,8	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3
225	13,8	13,9	14,0	14,0	14,1	14,2	14,2	14,3	14,4	14,5	14,5	14,6	14,7	14,7	14,8	14,9
250	13,7	13,7	13,8	13,9	13,9	14,0	14,0	14,1	14,2	14,2	14,3	14,4	14,4	14,5	14,5	14,6
275	13,6	13,6	13,7	13,7	13,8	13,9	13,9	14,0	14,0	14,1	14,1	14,2	14,2	14,3	14,3	14,4
300	13,6	13,6	13,6	13,7	13,7	13,8	13,8	13,9	13,9	14,0	14,0	14,1	14,1	14,1	14,2	14,2
350	13,6	13,7	13,7	13,7	13,7	13,8	13,8	13,8	13,9	13,9	13,9	14,0	14,0	14,0	14,1	14,1
400	13,8	13,8	13,8	13,8	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	14,0	14,0	14,0	14,0	14,1	14,1	14,1

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Haziran	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,2	19,4
110	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0
120	17,1	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6
130	16,9	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,3
140	16,6	16,7	16,8	16,9	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0
150	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7
160	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,4
170	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	17,0	17,1	17,2
180	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9	16,9
190	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,5	16,6	16,7
200	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2	16,2	16,3	16,4	16,5
225	15,0	15,0	15,1	15,2	15,3	15,3	15,4	15,5	15,6	15,6	15,7	15,8	15,9	15,9	16,0
250	14,7	14,7	14,8	14,9	14,9	15,0	15,1	15,1	15,2	15,3	15,3	15,4	15,5	15,6	15,6
275	14,5	14,5	14,6	14,6	14,7	14,7	14,8	14,9	14,9	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,3
300	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,6	14,6	14,7	14,7	14,8	14,8	14,9	14,9	15,0	15,0
350	14,1	14,2	14,2	14,2	14,3	14,3	14,4	14,4	14,4	14,5	14,5	14,6	14,6	14,6	14,7
400	14,1	14,2	14,2	14,2	14,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,4	14,4	14,4	14,5	14,5	14,5

Haziran	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
100	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1	20,2	20,3	20,4	20,5	20,5	20,6	20,7	20,8
110	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1	20,2	20,3	20,3	20,4
120	18,8	18,9	19,0	19,1	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1
130	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,6	19,6	19,7
140	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,0	19,1	19,2	19,3	19,4
150	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1
160	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,3	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8
170	17,3	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,2	18,3	18,4	18,5
180	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,0	18,1	18,2
190	16,8	16,9	17,0	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	17,9
200	16,6	16,7	16,7	16,8	16,9	17,0	17,1	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7
225	16,1	16,2	16,2	16,3	16,4	16,5	16,5	16,6	16,7	16,8	16,8	16,9	17,0	17,1	17,1
250	15,7	15,8	15,8	15,9	16,0	16,0	16,1	16,2	16,2	16,3	16,4	16,4	16,5	16,6	16,6
275	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,7	15,7	15,8	15,9	15,9	16,0	16,0	16,1	16,2	16,2
300	15,1	15,1	15,2	15,3	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,7	15,7	15,8	15,8	15,9
350	14,7	14,8	14,8	14,9	14,9	14,9	15,0	15,0	15,1	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3	15,4
400	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,8	14,8	14,9	14,9	14,9	15,0	15,0	15,0

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Temmuz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	20,9	21,0	21,1	21,1	21,2	21,3	21,4	21,5	21,5	21,6	21,7	21,7	21,8	21,9	21,9
110	20,5	20,6	20,7	20,8	20,9	20,9	21,0	21,1	21,2	21,2	21,3	21,4	21,4	21,5	21,6
120	20,2	20,2	20,3	20,4	20,5	20,6	20,6	20,7	20,8	20,9	20,9	21,0	21,1	21,2	21,2
130	19,8	19,9	20,0	20,1	20,1	20,2	20,3	20,4	20,5	20,5	20,6	20,7	20,7	20,8	20,9
140	19,5	19,6	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,0	20,1	20,2	20,3	20,3	20,4	20,5	20,5
150	19,2	19,2	19,3	19,4	19,5	19,6	19,6	19,7	19,8	19,9	19,9	20,0	20,1	20,2	20,2
160	18,9	18,9	19,0	19,1	19,2	19,3	19,3	19,4	19,5	19,6	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9
170	18,6	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,0	19,1	19,2	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5	19,6
180	18,3	18,4	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,8	18,9	19,0	19,0	19,1	19,2	19,3	19,3
190	18,0	18,1	18,2	18,3	18,3	18,4	18,5	18,6	18,6	18,7	18,8	18,8	18,9	19,0	19,0
200	17,8	17,9	17,9	18,0	18,1	18,1	18,2	18,3	18,4	18,4	18,5	18,6	18,6	18,7	18,8
225	17,2	17,3	17,3	17,4	17,5	17,6	17,6	17,7	17,8	17,8	17,9	18,0	18,0	18,1	18,2
250	16,7	16,8	16,8	16,9	17,0	17,0	17,1	17,2	17,2	17,3	17,4	17,4	17,5	17,6	17,6
275	16,3	16,4	16,4	16,5	16,5	16,6	16,7	16,7	16,8	16,8	16,9	17,0	17,0	17,1	17,1
300	15,9	16,0	16,1	16,1	16,2	16,2	16,3	16,3	16,4	16,4	16,5	16,6	16,6	16,7	16,7
350	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6	15,7	15,7	15,8	15,8	15,9	15,9	16,0	16,0	16,1
400	15,1	15,1	15,1	15,2	15,2	15,2	15,3	15,3	15,4	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6

Temmuz	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	22,0	22,1	22,1	22,2	22,2	22,3	22,3	22,4	22,4	22,5	22,5	22,6	22,6	22,6	22,7	22,7
110	21,6	21,7	21,8	21,8	21,9	21,9	22,0	22,0	22,1	22,1	22,2	22,2	22,3	22,3	22,3	22,4
120	21,3	21,3	21,4	21,5	21,5	21,6	21,6	21,7	21,7	21,8	21,8	21,9	21,9	22,0	22,0	22,0
130	20,9	21,0	21,1	21,1	21,2	21,2	21,3	21,4	21,4	21,5	21,5	21,6	21,6	21,6	21,7	21,7
140	20,6	20,7	20,7	20,8	20,9	20,9	21,0	21,0	21,1	21,1	21,2	21,2	21,3	21,3	21,4	21,4
150	20,3	20,4	20,4	20,5	20,5	20,6	20,7	20,7	20,8	20,8	20,9	20,9	21,0	21,0	21,1	21,1
160	20,0	20,0	20,1	20,2	20,2	20,3	20,3	20,4	20,5	20,5	20,6	20,6	20,7	20,7	20,8	20,8
170	19,7	19,7	19,8	19,9	19,9	20,0	20,1	20,1	20,2	20,2	20,3	20,3	20,4	20,4	20,5	20,5
180	19,4	19,5	19,5	19,6	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	20,0	20,0	20,1	20,2	20,2	20,3
190	19,1	19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,5	19,6	19,7	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	20,0
200	18,8	18,9	19,0	19,0	19,1	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5	19,6	19,6	19,7	19,7
225	18,2	18,3	18,4	18,4	18,5	18,5	18,6	18,7	18,7	18,8	18,8	18,9	18,9	19,0	19,0	19,1
250	17,7	17,7	17,8	17,9	17,9	18,0	18,0	18,1	18,2	18,2	18,3	18,3	18,4	18,4	18,5	18,5
275	17,2	17,3	17,3	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,6	17,7	17,8	17,8	17,9	17,9	18,0	18,0
300	16,8	16,8	16,9	16,9	17,0	17,0	17,1	17,2	17,2	17,3	17,3	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6
350	16,1	16,2	16,2	16,2	16,3	16,3	16,4	16,4	16,5	16,5	16,6	16,6	16,7	16,7	16,7	16,8
400	15,6	15,7	15,7	15,7	15,8	15,8	15,9	15,9	15,9	16,0	16,0	16,1	16,1	16,1	16,2	16,2

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Ağustos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	22,7	22,8	22,8	22,8	22,8	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9
110	22,4	22,4	22,5	22,5	22,5	22,5	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,7	22,7	22,7
120	22,1	22,1	22,2	22,2	22,2	22,2	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,4	22,4	22,4	22,4
130	21,8	21,8	21,8	21,9	21,9	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
140	21,5	21,5	21,5	21,6	21,6	21,6	21,7	21,7	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,9
150	21,2	21,2	21,2	21,3	21,3	21,4	21,4	21,4	21,4	21,5	21,5	21,5	21,6	21,6	21,6
160	20,9	20,9	20,9	21,0	21,0	21,1	21,1	21,1	21,2	21,2	21,2	21,3	21,3	21,3	21,3
170	20,6	20,6	20,7	20,7	20,7	20,8	20,8	20,9	20,9	20,9	21,0	21,0	21,0	21,1	21,1
180	20,3	20,3	20,4	20,4	20,5	20,5	20,6	20,6	20,6	20,7	20,7	20,7	20,8	20,8	20,8
190	20,0	20,1	20,1	20,2	20,2	20,3	20,3	20,3	20,4	20,4	20,4	20,5	20,5	20,5	20,6
200	19,8	19,8	19,9	19,9	20,0	20,0	20,0	20,1	20,1	20,2	20,2	20,2	20,3	20,3	20,3
225	19,1	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5	19,5	19,6	19,6	19,6	19,7	19,7	19,7
250	18,6	18,6	18,7	18,7	18,8	18,8	18,9	18,9	19,0	19,0	19,0	19,1	19,1	19,2	19,2
275	18,1	18,1	18,2	18,2	18,3	18,3	18,3	18,4	18,4	18,5	18,5	18,6	18,6	18,6	18,7
300	17,6	17,7	17,7	17,7	17,8	17,8	17,9	17,9	18,0	18,0	18,1	18,1	18,1	18,2	18,2
350	16,8	16,9	16,9	17,0	17,0	17,0	17,1	17,1	17,2	17,2	17,3	17,3	17,3	17,4	17,4
400	16,2	16,3	16,3	16,4	16,4	16,4	16,5	16,5	16,5	16,6	16,6	16,7	16,7	16,7	16,8

Ağustos	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9	22,8	22,8	22,8	22,8	22,7	22,7	22,7
110	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,5	22,5	22,5
120	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,3	22,3	22,3
130	22,1	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
140	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
150	21,6	21,6	21,6	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
160	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
170	21,1	21,1	21,1	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3
180	20,8	20,9	20,9	20,9	20,9	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,1	21,1	21,1	21,1
190	20,6	20,6	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,9	20,9
200	20,4	20,4	20,4	20,4	20,5	20,5	20,5	20,5	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,7
225	19,8	19,8	19,8	19,9	19,9	19,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,2
250	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,6	19,6	19,6	19,6	19,7
275	18,7	18,8	18,8	18,8	18,9	18,9	18,9	19,0	19,0	19,0	19,1	19,1	19,1	19,1	19,2	19,2
300	18,3	18,3	18,3	18,4	18,4	18,4	18,5	18,5	18,5	18,6	18,6	18,6	18,7	18,7	18,7	18,8
350	17,4	17,5	17,5	17,6	17,6	17,6	17,7	17,7	17,7	17,8	17,8	17,8	17,9	17,9	17,9	18,0
400	16,8	16,8	16,9	16,9	16,9	17,0	17,0	17,0	17,1	17,1	17,1	17,2	17,2	17,2	17,3	17,3

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

[illegible][illegible]

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Kasım	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	17,5	17,4	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,0	15,9	15,8
110	17,7	17,6	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1
120	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3
130	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5
140	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,7
150	18,3	18,2	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9
160	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1
170	18,5	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	17,9	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2
180	18,5	18,4	18,4	18,3	18,2	18,1	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4
190	18,6	18,5	18,4	18,4	18,3	18,2	18,1	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,7	17,6	17,5
200	18,6	18,6	18,5	18,4	18,4	18,3	18,2	18,1	18,1	18,0	17,9	17,8	17,8	17,7	17,6
225	18,7	18,7	18,6	18,5	18,5	18,4	18,4	18,3	18,2	18,2	18,1	18,0	18,0	17,9	17,8
250	18,7	18,7	18,6	18,6	18,5	18,5	18,4	18,4	18,3	18,3	18,2	18,2	18,1	18,0	18,0
275	18,7	18,7	18,6	18,6	18,5	18,5	18,5	18,4	18,4	18,3	18,3	18,2	18,2	18,1	18,1
300	18,6	18,6	18,6	18,5	18,5	18,5	18,4	18,4	18,3	18,3	18,3	18,2	18,2	18,2	18,1
350	18,4	18,4	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,2	18,2	18,2	18,2	18,1	18,1	18,1	18,1
400	18,1	18,1	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9

Kasım	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
100	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,3	14,2	14,1	14,0
110	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,6	14,5	14,4	14,3
120	16,2	16,1	16,0	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	14,9	14,8	14,7	14,6
130	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9
140	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2
150	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4
160	17,0	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6
170	17,1	17,1	17,0	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,9
180	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,1
190	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2
200	17,5	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,8	16,7	16,7	16,6	16,5	16,4
225	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,8	16,8
250	17,9	17,9	17,8	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,1	17,1
275	18,0	18,0	17,9	17,9	17,8	17,8	17,7	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4	17,4	17,3	17,3
300	18,1	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,8	17,8	17,7	17,7	17,6	17,6	17,5	17,5	17,4
350	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,8	17,8	17,8	17,7	17,7	17,7	17,6	17,6
400	17,9	17,9	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,6	17,6	17,6

Ek 2. İstanbul/Göztepe için Hesaplanan Aylık Toprak Sıcaklıkları. (Devam)

Aralık	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
100	13,9	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	12,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,4	12,3
110	14,2	14,1	14,0	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	13,0	12,9	12,8	12,7
120	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	13,0
130	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,1	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3
140	15,1	15,0	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6
150	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9
160	15,5	15,4	15,3	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2
170	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,7	14,6	14,5
180	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7
190	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9
200	16,3	16,2	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,2
225	16,7	16,6	16,5	16,5	16,4	16,3	16,2	16,2	16,1	16,0	15,9	15,9	15,8	15,7	15,6
250	17,0	16,9	16,9	16,8	16,7	16,7	16,6	16,5	16,5	16,4	16,3	16,3	16,2	16,1	16,0
275	17,2	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,5	16,4	16,4
300	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,8	16,7	16,7	16,6
350	17,5	17,5	17,5	17,4	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0
400	17,6	17,5	17,5	17,5	17,5	17,4	17,4	17,4	17,3	17,3	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2

Aralık	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
100	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,7	11,6	11,5	11,4	11,3	11,2	11,1	11,0	10,9	10,8	10,8
110	12,6	12,4	12,3	12,2	12,1	12,1	12,0	11,9	11,8	11,7	11,6	11,5	11,4	11,3	11,2	11,1
120	12,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,7	11,6	11,5
130	13,2	13,1	13,0	12,9	12,8	12,7	12,6	12,6	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8
140	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,0	12,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3	12,2
150	13,8	13,7	13,6	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	13,0	12,9	12,8	12,8	12,7	12,6	12,5
160	14,1	14,0	13,9	13,8	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	13,1	13,0	12,9	12,8
170	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1
180	14,6	14,5	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,5	13,4
190	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6
200	15,1	15,0	14,9	14,8	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	14,0	13,9
225	15,6	15,5	15,4	15,3	15,3	15,2	15,1	15,0	15,0	14,9	14,8	14,7	14,7	14,6	14,5	14,5
250	16,0	15,9	15,8	15,8	15,7	15,6	15,6	15,5	15,4	15,4	15,3	15,2	15,2	15,1	15,0	15,0
275	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	16,0	15,9	15,9	15,8	15,7	15,7	15,6	15,6	15,5	15,4	15,4
300	16,6	16,5	16,5	16,4	16,4	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	16,0	16,0	15,9	15,8	15,8	15,7
350	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,3	16,3
400	17,1	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,6

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları.

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: OCAK												
Günler	SAATLER																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	6,2	6	5,4	5,8	5,6	5,2	5,4	5,4	6,2	7,3	7,6	9,1	9,3	9,3	8,4	7,2	6,4	6,1	5,7	5,6	5,5	5,2	5,2	5
2	4,9	4,8	4,3	4,3	4,8	4,9	5	5,5	6,2	6,9	7,2	7,8	8,1	7,8	7,6	7	6,8	7	6,9	6,6	7	6,6	6,5	6,4
3	7	6,4	6,3	6,1	5,3	5,3	5,4	5,6	6,4	7,6	8,4	9,4	10,2	10,5	10,8	10,4	10,2	10,1	9,9	9,2	9,2	9,4	8,8	9
4	9,2	8,6	8,9	8,3	7,6	7	7,8	8	8,9	10,8	11	11,3	12	12,9	12,4	12,1	10	8,2	7,8	7,7	7,6	7,2	7,3	7,4
5	7,4	7,1	7,4	7,9	8,3	8,2	7,6	7,2	6,9	6,9	7	6,6	6,4	6,5	6,7	6,4	6,3	6,3	6,2	6,2	6	5,9	5,7	
6	5,6	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,5	5,5	5,6	5,9	5,9	5,9	5,7	5,3	5,3	5,3	
7	5,2	5,1	4	4,2	3,8	3	3,2	5,4	6	6,2	6,5	7,2	7,2	8	7,5	6,9	6,2	6,2	6,1	6	6	5,4	5	6,2
8	4,2	4,4	5,2	6,2	6,8	7	7	6,9	8	8,8	8,3	10,2	11,2	11,2	11,3	11,1	10,6	10	8,2	8,2	9,2	9,5	9,8	9,4
9	9	8,8	9	9	9	8,9	9,2	9,3	10,2	11,4	11,9	12,2	13	13,4	13,6	12,6,5	12,3	12,1	12	11,3	10,9	10,8	10	9,1
10	9,1	8,8	8,2	7,5	7,2	7,9	8	9	10,4	11,2	12,2	13,2	13,8	14	14,2	13,8	11	9,6	9	8,8	9	8,7	8,2	8,6
11	8,7	8,5	8	7,7	8,1	8,2	8,4	8,2	8,6	9,6	10,8	11,8	12,8	13,2	13,4	13,4	12,2	12,1	11,8	11,7	11,8	11,8	11,4	11
12	10,2	11,6	11,5	12	11	11,6	11,5	11,6	13,2	14	14	13,8	13,4	13,5	13,9	13,4	14	13,1	13	13,9	13,2	12,2	12,4	12
13	11,2	11	11,2	11,1	11,2	12,4	12	12	12,2	12,8	12,9	12,8	14,1	14	13,4	12,8	11,2	11,3	11	10,8	10,8	10,6	10,5	10,2
14	10	10,1	10	9	8,8	9,4	10	10,4	13	13,2	15	15,2	17,2	17	16,4	14,9	14	12,3	11,6	11,3	11,5	9,5	8,2	7,3
15	7	7,2	7,1	7	6,8	6,9	7	7,1	7,2	7,5	8,1	8	7,8	7,4	7,5	7,2	6,9	5,9	4,2	4,1	3,9	4	4,4	4,5
16	3,9	3,8	4,2	4,4	4,6	4,8	4,9	4,5	5,4	6,2	7	8	9,2	8,5	8	7,2	6,4	6,2	6,1	5,8	5,5	4,6	4,2	5
17	5	4,4	4,2	4,3	3,8	4	4,2	4,3	5,2	6,3	7,4	8,3	8,9	8,5	8,4	8,1	7,7	6,6	6	5,2	5,1	4,2	4,1	3,9
18	4	4,6	3,9	3,6	4,4	4,6	4,7	5	5,2	5	5,3	5,1	5,4	6,1	5	4,2	4,4	4,3	4,2	4,4	4,9	4,6	4,2	4,4
19	5	4,8	5	5	4,6	4,9	5,2	5,3	5,2	5,3	5,4	5,4	6	6,2	5,8	5,5	5,3	5	5	5	5	4,8	4,4	4,2
20	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4	3,4	3,5	4,1	4,3	4,3	4,3	4,6	5	5,2	5,2	5,2	5,1	5	4,7	4,8	4,8
21	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,1	5	5,3	5,4	6	7	7,4	7,5	7,4	7,2	6,9	6,5	6	5,4	5,2	5,2	5,1	5,1	5
22	5	4,9	4,8	4,6	4,3	4,3	4,3	4,4	5	5,2	6	6,2	7	7,2	7,1	6,9	6,2	6	6	6,1	6,2	6,2	6,1	5,9
23	5,5	5,3	4,9	4,9	4,8	4,9	5,3	5,4	5,4	5,6	6,1	6,4	7	6,8	6,2	6	5,2	4,9	4,3	4,3	4,3	4,1	4	3,3
24	3,2	3,2	3,3	3,4	3,4	3,2	3,3	3,2	3,2	3,3	3,4	3,6	4	4	4	4,1	3,9	3,9	3,8	3,7	4,2	3,6	3,6	3,5
25	3,2	2,8	2,4	2,3	2,3	2,2	2,4	2	2,1	5,8	6,9	7,8	8,8	9,2	8,8	8	6,5	5	4,4	4	3,9	3,4	3,2	3
26	3	2,9	2,6	1,9	1,4	1,2	2,5	3,2	6,5	7,3	9	9,7	10,8	11	9	7,8	6,8	5,4	4,8	5	4,5	4,8	4,4	4,3
27	3,4	3	2,6	2,4	2,2	2,3	2,9	4,9	6,5	7,4	8,2	8,5	8,8	9	9,2	9,3	7,8	7,2	7,2	6,4	7,2	7,8	8,2	7,9
28	7,8	8	7,9	8,2	8,4	8,1	8,6	8,6	9,6	11,2	11,4	12,4	13	12,6	11,8	11,8	11,7	11,8	12,4	12	11,8	10,6	10,2	10,8
29	10,9	10,2	10,1	10	8,8	8,9	9	8,2	9,6	10	11	11,6	12,4	11,9	8,8	8,6	8,4	8,4	8,8	8,9	8,8	8,6	7,2	6,2
30	5,5	5,2	5,1	5,2	5,7	5,8	6,5	6,9	7	7,2	7,2	8,2	9	9	7	5	3,2	2,4	1,5	0,9	0,8	0,2	0,2	0
31	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	1,2	1,2	1,2	1,5	1,8	1,9	1,8	2	2,2	2,3	2,6	3

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																									
İstasyon Adı: GÖZTEPE												AY: SUBAT													
Günler	SAATLER																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	3	3	3	3,1	3,1	3,3	3,5	3,8	4,2	4,4	4,5	4,9	4,9	5	4,3	4	3,9	3,8	3,7	3,3	3,2	3	3	3	3
2	2,9	2,9	2,8	2,6	1,2	1,9	2,2	2,2	2,3	2,5	1,9	1,7	1,5	1,8	1,3	1,2	1,2	1,3	1,5	1,5	1,3	1,2	1	1	1
3	1	1	1	0,9	0,2	0,1	-0,8	0,2	1	2	3,1	3,9	3,9	4	3,1	3	3	3	3	2,9	3	2,9	2,9	3	3
4	3,1	3,1	3,2	3,3	3,3	3,3	3,4	3,6	3,6	3,9	4,2	4,4	4,4	4,1	3,7	3	2,9	2,8	2,7	2,7	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2
5	3,2	3,2	3	2,5	2,5	2,6	3,4	3,5	4,6	5	6,4	6,5	6,3	7	7,6	7,2	7	7	7	7	7,2	7	7	7,1	7,1
6	7,2	7,2	7,7	8,2	8,5	8,2	8,2	8,3	8,2	8,9	10,2	10,2	9,4	9,2	8,1	8,2	8,2	8,2	7,7	8	8,4	8,2	6,9	6	6
7	5,2	4,2	3,9	3,9	3,2	2,8	2,3	2	1,6	1,6	1,6	1,9	2,8	3	2,6	3	3	3,1	3,5	4	4	3,5	3	2,9	2,9
8	1,5	1	0,3	0,3	3,6	3,7	3,8	3,5	3,9	6	6,8	7	8,2	8,8	8,4	8	7,8	7,9	8,2	8,4	9,2	9,5	9,4	11	11
9	11,1	10,3	7,5	7,8	8,2	7,8	7	5	4	4	4,8	6,2	6	6	6,4	6	5,4	5,2	5	3,9	3,8	4,7	4,8	4,9	4,9
10	5	5	5,6	5,7	6	6	5,9	7,2	9,2	10,5	12,2	13,2	12,5	12,6	11,2	11,2	11	11,2	10,7	10,5	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
11	10,2	11,3	11,9	12	11,7	12,2	11,3	12	14	15	16,6	17,7	17,5	17,8	16	15	15	14,2	14	13,9	14,2	13,3	13	13	13
12	13,1	13,1	13,1	13	13,2	13	11,6	8,6	8,4	7,6	9	9,8	9,8	10,2	11,2	10,2	8,2	8,2	9	9	9,2	8	9	9	9
13	8,6	8,9	10	9,9	9,6	8,9	8	8,2	9	9,8	10,5	10,9	11,3	11	10,6	6	6,6	6,9	6,9	6,2	5,6	4,9	5	5	5
14	4,8	5	5	5	5	5	5,1	5,2	5,4	6,2	7	6,9	6,2	6,3	6,1	5,9	6	5,9	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
15	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	5,9	6,1	6,1	7,3	7,1	8,2	8,8	8,6	8,2	8	7,2	6,8	5,9	5,9	6	5,4	5,1	5,6	5,6
16	5,1	5	4,6	4,9	4,4	4,1	4,2	4,6	5,2	6,8	8	8,6	8,6	9	9,1	7,5	6,9	6,1	6	5,8	5,8	5,6	5,6	5,8	5,8
17	5,8	5,9	5,4	4,2	3,9	3,9	4	4,9	6	8	8,2	9	9,6	9,8	9	8,8	7,8	7	6,4	6,6	6,8	6	5,2	5,6	5,6
18	5,4	5,4	5	4,2	4,3	4,3	5	6,3	7,4	8	9,2	10,4	10,8	10	10	10,2	9,8	8,8	8	7,2	6,1	1,8	1,9	2,2	2,2
19	2,4	2,1	2,1	1,9	1	0,2	0	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,2	0,8	1,2	1,7	2	2,2	2,3	2,2	2,2	2,3	2	1,5	1,5
20	1,2	1	0,2	0	-1,2	-1,1	2,2	2,4	3,2	3,8	4,4	5,2	5,6	5,4	5	5,3	5,6	5,9	6,3	6,5	6,8	7	6,9	7,1	7,1
21	7,2	7	7	6,9	6,4	6,9	7,3	7,6	8	9,3	10,5	11,4	11,1	10,6	10,3	9	8,4	8,2	8	8,1	8,6	8,8	8,9	9	9
22	8,9	8,9	8,9	8,4	8,8	8,9	9,3	9,9	10,2	11,2	12,2	11,8	11,8	11,7	11,2	11	11,3	11,9	12,2	11,9	12	11,2	11,8	11	11
23	11,9	12,2	12,6	12,9	11,8	12,8	12	12,6	11,9	13,8	14,2	14,9	15	14,3	14,4	13,5	8,8	8,5	8,6	8,8	9	9,2	9,2	8,8	8,8
24	7,8	7,4	7	6,2	5,8	6	6	6,1	6,2	6,1	6,3	6,5	6,8	7,5	8	7,2	6,2	6	6	6,1	6,2	6,2	6,1	6,2	6,2
25	6,2	6,2	5,2	5	4,3	4,5	4,6	6	8	8,2	8	9,4	10,2	10,9	9,8	9,4	9,2	9,6	9,8	9,2	9,2	8,8	8,2	7,9	7,9
26	7,8	7,4	6,6	6,8	6,5	6	6,2	7,2	8,2	8,8	8,9	8,6	8,4	8	7,2	6,8	6,2	6	6,1	6,2	6,3	6,1	6	5,3	5,3
27	4,8	4,6	4	3,7	3	3,4	3,3	3,9	6,5	8,4	9,2	9,9	10,2	10	10,2	10,7	9	8,4	7,8	6,6	6,5	6	6	5,7	5,7
28	4,6	4	3,4	3,1	3	4	5	7,2	9	9,7	10,4	11,2	11,6	11,9	11,9	11	10	8,8	7,6	7,4	7,4	7,2	6,8	6,3	6,3

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												AY: MART												
Günler	SAATLER																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	5,9	5,3	5,2	5	4,9	4,9	5	7,9	10	12,1	12,4	13,6	14	14,8	14	11,3	11,9	11	10,4	10	9,4	8,5	8,8	8,8
2	8,5	7,2	6,2	6,4	6,8	6,8	7	10	11,2	11,8	11,8	12,6	12,6	13,2	13,4	13	11,3	11	10,4	10,2	10,2	10,2	10	9,6
3	9,4	8,6	9	9,1	9,1	8	8,6	9,8	10,4	10,8	11,9	11,8	13	13,2	14,2	13,4	12,7	11,2	11	10	9,6	9	8,6	8,2
4	8,2	8,4	9,2	9,8	10	10,3	11,8	12,4	13,9	14,4	15,2	15,8	18,2	17,8	18,4	18	17	15	13,9	13,8	14,2	14,7	14,7	14,1
5	13,2	13,2	13,2	12,4	11,2	11,9	12	13,2	13,8	15,2	16	18,4	19	19	18	15,2	14,3	14	15	14,4	14,6	14,6	14	12,4
6	12	11,8	11,6	12	12,9	12,4	13,2	14,4	15,3	15	16	16,4	17,2	17	16	15,3	14,8	14,2	13,5	13,5	13,1	13	12,6	12,3
7	12,5	12,2	11,4	11,1	11,1	10,2	10,3	12,8	15	15,6	16,2	16,2	16,6	17,5	18	18,4	18,5	16,6	15,1	13,7	13,1	12,8	12,8	12,6
8	11,6	10,6	10,4	11,2	10,4	10	11	14,8	17	18	17,4	19,2	19,2	19,7	18,5	20	19	14,2	14	9,8	9,2	9	9,3	9,3
9	8,3	8	6,9	7	7	7,2	8	8	8	9	9,2	9,9	10,6	11,2	11,2	10	9,8	9,2	9	9	9	8,5	8,6	8,9
10	8,5	8,2	6,9	6,4	6,3	6	5,8	8,2	10,3	11	10,3	11	11,2	11,3	11,3	11,2	10,3	10	9,2	8,6	8,4	8,3	7,8	7,2
11	6,5	6,1	5,8	5,7	5,3	5,3	6	8,3	10,9	11,2	12	13	13,6	13,6	13,5	12,6	12,2	11,9	11,8	10	10	9,1	7,7	7,3
12	7	6,9	6,2	8	6,9	6,8	8,1	9,4	11,1	12,1	12,4	12,1	12,8	13,5	14,1	11	8,2	8,1	8,3	8,2	8,5	8,3	8	7,8
13	7,5	7,1	6,8	6,5	6,3	6,3	6,6	7	8	8	9,8	9,5	10,3	10,2	10,8	10,3	10,2	9,5	8,8	8,9	8	7	6,2	6
14	5,9	5,4	5,6	6	6,1	6,2	6,5	7	8	9,1	9,2	10	8,5	8,3	6	5,8	5,7	5,2	5	4,6	4,2	3,8	3,3	3,2
15	3,8	3,9	3,8	3	2,9	2,9	3	4,5	5,2	5,2	5,6	6	6,2	6,9	6,8	6,2	5,6	4,9	3,9	4	4	3,8	3,6	3,2
16	2,4	2	2,2	1,8	1,9	2	2,6	5,5	7,2	8,6	8	7,8	7,5	7,3	4,8	4	4,2	4,4	4,3	4,4	4,8	4,3	4,3	4,2
17	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4	4,3	4,8	5	6	6,8	6,9	7	6,7	6,6	6,4	6	5,4	5,2	5	5,4	5,2	5	4,9
18	4,4	4,1	4,2	4,3	4,6	5	5,5	5,8	6,2	7	7,8	7,9	8	8,2	7,6	7,2	7	7	7	7,1	7,2	7	7	7
19	7	7	7	7	7	7	7	7,2	7,3	7,8	7,9	7,9	8	8	7,8	7	6,9	6,8	7	7	6,8	6,5	6	5,4
20	5,2	5	4,9	4,9	4,9	4,8	4,8	4,8	4,9	5,2	5,1	5	5	5,2	4,9	4,9	4,6	4,4	4,4	4,6	5	4,7	4,7	4,6
21	4,4	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,9	5,2	5,9	6,2	7	7,4	7,8	7,6	7,9	7	6,2	5,8	5	6	6	6	5,9
22	5,8	5,6	5,4	4,5	5,2	5,3	6,2	6,9	7,4	8,6	8,6	9	9,8	9,5	9,9	9,8	9	8,1	8	7,9	7,7	6,5	7,5	7
23	7	6,8	6,8	6,9	6,6	6	6	7,5	9,5	10,5	11,2	12	11,8	12,8	12,5	13	12,8	11,2	10,6	10,3	10,2	10,3	10,1	9,9
24	9,6	9,3	9,3	9,3	9,4	10	12	12,5	13,3	15	16,5	16	17	16,9	16,9	15	14,3	13	11,1	10,1	10,3	9,3	9,3	8,7
25	8,5	8,8	8,9	8,3	7,3	8,2	8	8,8	9,8	10,2	10,8	10,8	11	11	11,2	10,3	10	8,7	7,8	7,3	7,2	6,2	6	5,5
26	5	5,1	5	4,5	4	4,2	5,8	8	9,3	10,5	11,5	12,2	12,5	12,2	12	11,2	10	8	6,9	6,2	6	5,5	5,2	5
27	5	4,9	4,6	4,4	4,5	4,4	5,3	8	10	12	14,8	14,5	15,9	15,6	14,1	15,1	14	12,5	11,4	10,8	10,8	10	9,2	9,2
28	9	9,2	9,3	9	9	9,2	9,5	10	12	13	13,3	14	14,9	14,2	14,8	14,7	13,5	12,5	11,8	11,5	10,3	9,5	9,3	9
29	8,8	8,5	8,5	8,4	8,2	8,2	8,5	8,8	9	9	10,1	9,9	9,8	9,5	9,6	8,9	8,8	8,2	8	8	8	8	7,9	8
30	8	7,9	7,8	7,6	7,5	7,3	7,2	7,3	7,9	8,2	9	9,8	9,7	9,5	8,9	8,9	7,8	7,2	7,1	7	7,1	7	7	7
31	7	7	7	7	7	7	7,1	7,8	8	8,8	8,7	8,5	8,2	8,2	8,2	8,3	8,4	8,3	8,2	8,3	8,2	7,5	7,3	7,2

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																									
İstasyon Adı: GÖZTEPE													AY: NİSAN												
Günlr	SAATLER																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	7,1	7,1	7,2	7,3	7,2	7,4	7,8	7,7	7,8	7,7	8	8,4	8,8	9,2	8,8	8,2	8,1	8	8,3	8,4	8,6	8,1	8,2	8,2	8,2
2	8,1	8	8,2	8,1	8,3	8,2	8,2	8,2	8,4	9,2	9,1	10	11,4	12,9	12,7	12,8	12,3	12	11,2	11	12	11	10,9	10,6	
3	10,4	10,2	9,8	9,9	9,9	9,5	9,5	10,2	10,6	11	10,8	12,8	13,4	13,5	14,4	13	10,2	9,4	8,8	8,6	9,3	8,5	8,2	7,9	
4	7,9	7,8	7,3	7,1	7,1	7,3	7,6	7,9	8,1	8,3	8,8	9,2	10,2	10,7	11,2	11,3	10,8	10,3	9,3	9	8,7	7,9	7,3	7	
5	6,9	6,7	6,3	5,5	5	4,1	4,3	4,6	7	11	11,6	13,2	15,8	14,3	16,2	16,2	15,3	13,2	11,8	11,2	10,6	10,2	9,2	7,9	
6	7,8	7,9	7,8	7,5	7	7,1	7,5	8,3	10	11	11,8	11,8	12	12	12	12	10,7	9,6	9	8,8	8,4	8	7,2	7,1	
7	7,1	6,9	6,3	6,2	6	5,3	6,8	8,4	9,2	9,9	10,4	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11	10,2	10	9,8	9,6	8,8	8,4	8	
8	7,8	7,9	7,2	7,3	6,4	7,2	8,8	12,1	13,6	14,3	15,4	16,4	16,8	17,6	17,8	17,9	17,5	16,6	14,8	13,9	13,2	12,2	12,2	11,3	
9	10,2	9,8	9,2	10,3	8,8	8,9	10,4	14,4	15,2	17,4	18	18,3	19,2	19,9	20,3	21	19,2	19	16,6	16,2	15,8	15,3	15	14,4	
10	13	12,9	12,4	12,1	11,8	11,4	13,1	15,4	18,2	19,3	20	19,6	19,9	20	20,9	21	21,5	17	16,9	17,2	17,2	17,1	16	16,9	
11	17,2	17,3	18	16	15,2	15	16,3	17,2	17,4	17,4	17	16,3	17,2	18,9	15	16,6	15,4	14,7	14,6	14,2	14,1	13,4	13	12,8	
12	12,3	11,8	11,4	11,6	11,5	11,7	12,8	13,8	14,8	15,2	15,4	16	16,6	17	16	16,8	15,8	14,6	13,8	13,6	13,3	13	12,8	12,8	
13	12,7	12,7	12,6	12,6	12,6	12,6	13	14,2	15,8	16	16,4	17,2	17,8	18,5	19,2	19,4	18	17	16,2	15,3	15,5	14,8	14,2	14,2	
14	13,8	14,1	14,5	13,8	13,6	14,8	15	14	14,2	14,2	13	11,8	11	11	12	13,4	13,1	12,2	12,4	12,2	12,4	12,3	12,5	12,6	
15	12,2	12,2	11,4	11,2	10,2	11,2	13,1	13,5	14,2	15	15,8	16,2	17,2	17,3	18	18,6	17,8	17	15,2	14,2	13,8	12,7	12,3	13	
16	12,2	11,3	11,2	10,3	10	10,8	12,7	16,6	18,2	19,4	20	19,8	21,2	22	22,4	22,3	21,2	20,2	19,6	18,8	18,1	16,9	16	15,8	
17	15,6	15,2	15,8	15,6	15,4	15,8	16,3	18,3	20	21,8	22	22,4	21	22,5	24,2	24,8	24	22,2	21	20	18,9	18,1	16,2	16,4	
18	16	15,4	15	13,8	13,2	14,2	15,1	19,4	21	22,6	24	25,4	26,2	26,4	26,2	26	25,8	23,5	21	20,8	17,4	17,4	16	16	
19	15	14,6	13,7	13,3	13,8	13,2	13,7	14	15,2	15,2	16,2	16,8	17	17	17,5	17,5	16,2	14,9	14	13,8	13,8	13,5	12,9	12,7	
20	11,8	11,6	11,8	11,7	11,4	11,3	13,8	15,3	15,4	16,3	17,2	17,5	17,1	17,5	18	18	16,9	16,5	16	15,8	15,5	15	14	13,2	
21	12,8	12,2	11,6	11	10	10	11,2	11,8	13,6	13,9	13,7	13,2	13	13,9	13,2	13	14,1	13,2	12,1	11,9	11,6	11	9,9	9,9	
22	10	10	8,1	9,1	7,3	7,4	11,5	12,5	14,5	15,5	16,2	16,1	16,2	17	17,9	17,8	17,5	16,5	15	15	14	12,9	12,8	12,5	
23	12,1	11,8	11,8	10,8	10,5	9,9	12,4	14,2	16	18,2	19,8	20,2	20,8	21,3	21,6	21,6	19,7	18	17	16	16	15,2	15	14	
24	13,7	13	13	12,6	12,5	13	14,5	17,5	18	20	20,8	20,2	22,2	22,6	22	21	20	18,5	17	15,2	14,6	14	13,2	12,2	
25	12	12	11,8	11,8	11,8	12	13,8	14,8	16,5	18	19	20,5	21	21,4	18	18	16,5	15,5	14,5	14,3	14,5	14,5	14	13,2	
26	14	14	14,2	14,3	14	13,6	14	16	18,5	20,2	21	21,4	20,8	21	21	20,8	20,2	18,2	17,8	17,8	17,2	17,2	16,8	15,8	
27	15,4	14	13,6	13,1	13	13,8	14,9	15,9	16,2	17	18,2	17,2	17,4	17,8	17,2	17,2	18,2	16	15	14,4	14,4	14	13,2	13,1	
28	13,1	13,3	13	12,2	11,9	12,8	14,6	15,4	15,6	15,9	16,4	16,5	18	19	16,8	16	15,9	14,8	14,6	14,1	13,8	13,3	13,1	12,9	
29	11,9	12,3	13	13,3	13,4	13,6	14,2	15,2	15,9	16,3	16,2	16	17	17,6	18	17,9	18,5	17,9	17,1	16,3	16,6	16	15,8	15,4	
30	15	14,7	13,9	14,1	14,2	14,8	16,5	17,8	18,2	19,5	21,2	21,2	23	22,4	23,2	22,2	21,4	21,4	20,3	19,9	19,4	18,3	18,8	19,5	

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																							
on Adı: GÖZTEPE												AY: MAYIS											
SAATLER																							
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
2	15	18,2	18,8	20,2	21,2	21,9	21,6	22,2	22	22,6	23	24	20,2	20,8	20,4	20	19,2	18	17,6				
4	18,9	21,2	23	24	25,4	26,2	25,8	24,4	25,2	24,2	24	24,2	23	22	21,2	20,5	19,8	18,8	18,6				
2	17	19,1	20,2	21,2	21	22	24	24,5	24	23	22,7	22	21	19,4	18,8	17,4	16,5	16,2	15,2				
4	14	16,2	17,5	17,5	20	21,5	22	22,2	23,3	22,5	21,9	22	20,8	20	19,6	20,9	20	19,2					
3	17,5	18,3	18,8	20	20	19,5	19,5	20	20,2	20	19,8	17	15	14	14	13,8	13	13					
1	11	11	10,8	10,7	10	9,2	9,1	9,2	9	9,2	9,2	9,8	9,8	9,8	9,5	9,2	8,8	8,5	8,3				
8	8,2	9,1	9,2	10	11,6	12,7	13,1	13,2	13,4	12,8	12,2	11,8	10,5	10	9,9	9,8	9,2	8,3	8,2				
8	8,5	10	11,5	13	13,5	14,2	14,9	15	15	14,8	14	13	12	10	9,5	9,4	9	8,8	8,2				
2	8,2	10,1	12,2	13,2	14,4	14,2	15,6	18,2	18,2	17,8	17	16	15	13	12	11,8	11,2	11	10,2				
4	10,2	12,5	13,4	15	15,8	16,2	16,8	18	18,8	17,8	20,2	19,4	18,2	16	15,2	15	13,5	12,9	12,4				
3	10,8	11,5	14,2	16,8	18,4	19,8	20,6	21,3	21	20,4	20,3	18,4	17,3	16	15,4	15,1	13,6	12,6	12				
9	13,3	14,6	15,1	16,4	17,4	18,8	19,8	19,8	20,2	21,9	22	21	20,7	20	18,3	17,6	17	17,4	18,2				
2	17,8	17,3	17,1	17,4	19	21,4	21,9	22,2	22	20	18,8	18	16,6	15,2	14,6	15,2	15,2	14,8	14,6				
6	13	13,3	15	16	17,3	17,8	18,2	19,4	19,7	19,5	20,2	20,3	19,8	18,8	18,2	18,4	17,6	16,9	16,6				
6	18,2	19	20,2	21	22,2	24	25,2	26,3	26,9	28	27	24,2	24	23,2	22,4	21,7	21	20	19,8				
8	18,3	18,3	19,1	19,8	20,8	21,2	21,4	20,8	21,2	22,8	23,2	22,9	22,8	20,8	19,8	19,2	19,5	19,8	18,2				
4	14,5	14,3	14,4	15,2	15	15,3	16	17	18,3	18	17,9	17,3	16	15	14,7	14,2	13,8	12,8	12				
1	13	15,2	16,3	18,8	18,9	19,2	20,2	20,3	21	22	21,3	20	19	18	17,3	16,6	16	15,6	15,1				
4	14,7	14,3	13,9	13,5	14	16,1	16	17	17,2	17,1	17,1	16,8	16,1	14,2	13,3	13	12,2	12	11,8				
0	11	13	15,5	17,2	18,5	20	21	22,2	22	21,5	20,5	20	18,9	16,9	16	14,8	16,2	14	14				
3	13,5	15,4	16,8	17,5	19,5	21,7	23	24,1	25	24,5	24	24,1	23,9	22,1	20,1	19,2	18,4	18	17,2				
5	16,6	20	21,2	20,8	22,2	24	25,5	27,2	27,5	28,5	27,9	26	24,8	23,6	23	21,7	20	19,1	19				
5	16	18,4	19,8	21,5	21,5	23,2	23,4	23,6	23,4	21,8	21,5	21	20	18,2	18	16,9	16,3	16,2	16				
3	16	17,6	18,5	20	20,2	20,8	20,3	20	19,8	19,2	18,7	17,8	17,3	16,9	16,8	16,3	16,2	16,1					
6	15,8	15,8	16	17,2	17,5	17,8	17,5	18,4	18,8	18,4	17,4	16,2	16,2	15,9	16,2	16,2	15,8	16,2	15,4				
5	16	16,3	17,8	18	18	18,5	19	18,8	19,2	20	21	20,4	20,3	19,4	18,8	17,8	16,3	15,5	15				
4	15,4	17,4	17,8	18	19,8	20,2	20,8	21,4	22,4	25	24,8	24,2	23	21,4	20,2	19,9	18,8	17,9	17,6				
5,8	18,8	19,2	22,6	24	25,2	26	26,4	26,2	26,2	25,2	24,3	23	21,4	19,6	18,9	18,6	17,9	17,3	17				
5,4	17,6	19,5	20	21,2	22	22,8	23,4	23,2	23,4	23	22,4	21,2	20	18,4	17,8	17,9	17,2	16,9	16,8				
6	17,2	18	19,4	20,4	21,4	22,2	22,4	22,4	23	23,1	22,8	22	21	19,8	18,8	18,4	18	17,3	17,1				
5,3	16,9	17,3	17,4	18,2	20	20,5	21	22	22,9	22,1	24,3	24,8	24	22,5	21,2	20,4	20	19	18				

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: HAZİRAN												
Güler	SAATLER																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	17	16,5	17,4	17,3	17,2	18,4	19,6	20,4	21,3	22,1	22	23	23,4	24,3	25,5	25,9	25,4	24,9	24	23,3	22,2	21,5	21,2	21
2	21,4	17	17,7	17,4	17,7	18,2	19	19	18,8	19	19,2	20	18,2	19	18,6	18	17,8	17,8	17,7	17,4	17,4	17	16,3	15,5
3	15	15	14,1	13,7	13,8	15,5	17,5	18,3	17,5	18,5	19,2	20	20,8	21,3	21,2	21	20,2	20,2	20,3	19,7	18,8	18,5	18,4	18
4	17	17	17,2	17,2	17,1	18	19,3	20,6	21,2	21,5	22	22,9	22,4	23,4	25	25,2	24,2	22,5	20	19	18,7	18,2	17,9	17,4
5	17,2	17	16,9	16,9	17,2	17,2	16,5	16,5	17,8	20	22	22,5	23,5	24	23,2	22,1	21,2	20,2	19,1	18,9	18,4	18	17,9	17,9
6	18	18	17,5	17,5	17,8	18	18,2	19,1	19,8	21	21,8	22,2	22,8	23,2	23	22	22	21,5	20	19,6	19,2	18,9	18,4	18,3
7	18,2	18	17,9	18	18	18,1	19,3	20	20,7	21,2	21,9	22	22,6	24,6	24	23,2	22	21,4	20,2	19,8	18,8	18,6	18,4	18,1
8	17,2	17,2	17	16,9	16,9	18	18,7	19	20,2	20,4	20,6	21,1	21,2	21,4	22,2	22,8	23,3	24	22,8	21,7	21,2	20,8	20,4	20
9	20,2	20,2	19,9	19,4	19,5	19,8	21	21	22,2	23	23,8	24,2	25,4	25,8	25	25	24,8	23,2	21,8	21,2	20,6	20,2	20	20
10	19,6	19,2	19,4	19	19,1	19,3	20,2	19,6	21,2	23	23,6	23,2	22,8	22,6	22,8	22,8	24	23,6	22	21,9	21,2	20,4	20	20
11	19,9	19,9	19,5	19,1	19,1	20,1	20,6	21	22	22	22,2	22,6	24,8	25,2	25,3	25,3	25,1	24,3	23,4	22,6	22	21,4	20,9	20
12	19,8	19,2	18,9	18,8	18,4	19,8	21	21,6	22,8	23,2	23,8	23,3	26,3	27	27,3	27,5	26	24	22,7	22,2	22	21,2	20,8	20,2
13	20	20	19,8	19,3	19,9	20,2	21,2	21,8	23	23,3	23,2	24,8	24,2	25,2	26	25,2	25,1	24	23	22,8	22,2	22	21,8	21,4
14	21	20,9	20,7	20,4	20,2	20,9	22	23,8	25,2	26	26,2	26,4	26,4	26,1	26,1	26	25,1	24,2	23	22,8	22,1	21,8	21,6	21,2
15	21	20,8	20,4	20,1	20,1	21,2	23,2	22,1	23	23,8	27	27,8	28	29	28,2	28	26,8	26	24,9	23,5	22,6	22,2	22	22
16	21,4	21	20,9	20,2	20,3	21,8	22,6	23,5	25,3	26	27,3	27,9	27,8	27,4	27	26,9	26	25	23,5	22,3	21,8	21,6	21,4	21
17	20,5	20,2	20	20	20	21	22,5	23,5	25	26	27	27	27,2	27	27	26,2	25,5	24,8	23	22,5	21,8	21,4	21	20,4
18	20,3	20	20	19,5	19,5	20	21,9	23,2	25	26,5	28,2	28	27,5	28,4	27	26,8	25	24	23,5	23,3	22,8	22,3	22,1	21,9
19	21,9	21,9	21,9	21,8	21,8	22,5	23	24,1	24	23,8	24,5	24,5	25	26,4	26,1	25,5	25,2	24,3	23,1	23	22,9	22,2	22,4	22
20	21,4	21,1	21	20,9	21	21,8	22,2	23	24	24	24,5	25	24,5	24,5	25,3	25	25	24,5	24	23,3	22,4	22,1	22	21,2
21	21,5	21,5	20,8	20,3	20,1	21	23	23,5	23,8	25	26,5	26,8	28,4	28,5	28,5	28,7	28,5	28	26,5	25,2	24,6	24	24,5	24
22	24	24	24	24	23,3	24,3	26,3	27,5	28,8	30	31,5	31,5	33	33,4	33,7	33,9	33	32	28	27,5	27	26,2	25,2	21,2
23	19	19	20	19	18	18	18,8	20	20,3	20,1	20,1	21	22	23	23,3	23,7	23,1	23,1	22,1	21,9	21,4	20	19,1	19,1
24	18,8	18	17,9	17,5	15,1	15,1	15,1	15,5	15,5	15,3	15,9	16,5	17,1	17,6	18,5	19,9	20	18,9	17,9	17,9	18,4	18,7	18,3	18,1
25	18,5	19	18,3	19	19,5	20	20	19,3	19,9	18	17,9	18	18,5	18,6	18,9	18,9	19,3	19,5	19	19	19	18,5	18,5	18,3
26	18	18,1	18	17,5	17,9	17,8	17,4	18	18,9	18	17,7	17,3	17,8	18,8	18,1	18,1	18,1	18,1	18	18	18	17,4	17	17
27	17	17,1	17,5	17,5	17,8	18	18,5	19,3	19,8	20,5	20	20	21,5	22	22,5	23,1	23	22,5	21,5	21	20	19,8	19,3	19
28	19	18,2	17,9	17,8	17,5	18	21,2	21	22	22,8	23,8	23	24	25,4	25	25,5	26	25	25	24,3	23,8	22,2	21,2	21
29	20	20	19,3	19	19,5	21,8	22	22,4	24	24	25	26,2	26,1	26,8	29,9	29,8	29	27,8	26,3	25,1	24,2	23,5	23	22,1
30	22	21,9	21,4	21	22	23,5	23,5	23,5	24,5	25,5	26,5	26	27,3	29	28,5	28	27	27	25	24	23	22,7	22	21,9

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: TEMMUZ												
Günler	SAATLER																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	21,3	20,9	20,7	20,9	21	21,4	22,7	23,8	25,1	26,2	27,4	28	28,1	27,2	26,3	26,2	26	25	24,7	23,6	22,8	22,4	22,2	21,9
2	21,9	21,5	21,1	20,8	20,7	22	23,2	24,2	25,7	26,4	26,2	27,3	27,8	28,8	28,4	28,1	27,8	26,9	25,9	24,1	23,3	22,8	22,4	21,9
3	21,1	20,6	20,5	20,4	20,4	21,9	23	23,8	23,9	24	25	25,9	25,1	29,6	28,5	28	27,1	26,1	25,2	24,2	23,8	23,2	22,9	22,4
4	22,3	22	21,9	21,7	21,4	24,1	24,4	24,3	24,2	25,1	26,2	26,1	28,3	28,8	28,5	27,9	27,2	26,3	25,3	24,5	24	23,8	23,6	23,4
5	23	22,8	22,7	22,8	22,8	22,9	24,7	25,1	25,9	28,4	28,8	29,2	29,5	29,6	29,5	29,3	27,5	26,6	25,3	24,8	25,1	24	23,8	23,4
6	23,2	23,1	23,1	22,8	22,8	24	25	26	27,4	27,3	28	28,6	29,4	29	28,8	28,7	28	26,9	25,8	25	24,5	24,1	24	23,7
7	23,4	23	22,8	22,8	22,8	24	25,1	26,2	27,3	28,4	29,5	29,8	30,2	30	29,6	29,3	29,1	28,1	26,9	25,6	25	24,8	24,4	24,1
8	24	23,8	23	23	23,4	24,5	25,8	26,9	28,3	29,5	30,2	30,3	30,8	30,7	30,8	30	29,2	28,8	27,8	26,7	26	25,4	25	24,4
9	24,2	24	24	23,8	23,7	24,6	26,4	27,8	29	30,5	31,8	32,3	32,5	32	31	30	29,5	29	27	26	25,4	25	24,6	24,3
10	24	23,8	23,5	23	23,2	23	25,8	26,8	27,8	29,5	30,5	31,5	31,5	31,8	31	31	29,5	28,8	27	26	25,6	25	24,8	24,3
11	24	24	23,6	23,3	23,3	24,3	25,9	27	27	27	27,2	30,5	31	31	30,5	30	30	28,5	27	26,2	25,8	25,6	25,3	25
12	25	24,9	24,6	24,5	24,5	24,8	26,9	27	27	28,1	29	29,8	30	29,2	29	28	27,5	26	25	24,3	23,8	23,5	23	22,8
13	22,3	22	21,7	21,3	21,2	22	23,8	24,9	25,9	26	27	27,4	27,4	27,3	27,2	27	26,1	25,2	24,5	23,6	22,8	22,5	22	21,9
14	21,9	21,2	21	21	20,5	21,2	23,2	25	25,9	27	27	28	28,3	28,4	28,3	28	27,5	26,5	25	24	23,5	22,5	22,1	22
15	21,1	20,9	20,2	20	20,5	21,8	22,1	24	24,5	25	27	26	27,1	28,6	28,5	27,9	27	26,8	25,5	24,9	24,4	23,9	23,5	23
16	22,9	23	22,7	22,3	22,3	22,2	22,6	23,1	25	24	22,6	23	25	25,2	24,7	24	23,7	23,6	22,9	22,7	22,6	22,1	22	22
17	22	22	21,8	21,9	21,7	22	22,6	23	24	24,3	25,1	25,1	25,4	25,8	25,3	25	24,7	24,2	23,2	22,5	22	21,5	21	20,9
18	20,5	20,3	20,2	20,1	20,2	21,7	22,8	23,4	24,4	25	24,3	23,6	24,7	24,8	24	23,8	23,5	23,3	22,9	22,3	22,2	21,7	21	20,7
19	20,1	20	19,4	19,7	19,6	21,2	22,9	23,9	25	26,2	27	26,6	27,9	27,8	27,4	27	26,6	25,2	24	23,4	22,4	22	21,6	21
20	20,6	20,4	20	19,5	19	20	22,6	24,5	25,4	26,9	27,5	28	28,2	28,4	28	28	27,5	27	25,2	24	22,8	22,2	21,8	20,8
21	19,8	19,6	19,6	18,9	19	19,5	22	23,5	24,6	24,8	25,2	26	27,5	28,6	28,6	30	29,6	28,5	27	26	24,8	24	23,2	23
22	22	21,8	21,8	21,8	21,6	22	24	26	28	29,2	28,8	27	30,4	31,2	31	30,8	30	29	27,4	26	24,8	24	23,8	23
23	22,8	22,2	22	21,6	21,6	22	24,6	26	27,2	28,4	29,4	29,4	30	30,2	29,8	29	28,4	27	26	24,8	24	23,8	23,6	23,4
24	22,8	22,4	22	22	21,6	22,8	24,4	27	27,8	28,8	29,8	30,8	30,8	30,6	29,4	29	28,2	27	26	25	25	24,8	24,4	24
25	24	24,2	24,6	24,8	24,8	25	25,8	27	28,8	29,8	30,2	30,6	31	30,8	30,6	30	28,8	27,6	26,2	25,8	25,5	25,5	25,4	24,9
26	24,4	24,1	24,2	24,3	24,8	25	25,2	25	25,4	26,2	26,7	27,2	28,8	28,8	31,2	30,4	29,4	28	26,8	25,8	25,5	25	24,8	24,6
27	24,4	24	23,8	23,8	23,7	24,2	25	26	26,7	28,3	28,8	29,8	30,1	29,2	29	27,9	27,8	26,9	25,9	25,8	25,6	25,5	25,6	25,3
28	25,2	25,2	25,4	25,3	25,1	25,1	26,2	26,5	26,7	26,9	27	27	27,7	27,5	26,8	26,3	26,3	26	25,8	25,3	24,8	24,7	24,4	23,9
29	23,8	23,9	24	23,8	23,5	23,3	25,3	26	26,6	25,3	27	27,8	29,5	29,4	29,3	29,4	28,8	27,7	26,3	25,6	25	24,7	24,5	24,1
30	23,9	23,7	23,6	23,4	23,2	23,3	24,6	25,8	27	27,7	28,1	29,8	29,9	29,4	28,9	27	26,3	25,7	25	24,5	24,4	24,4	24,2	24
31	23,9	24	20,6	20,6	20,9	21,8	23,1	23,8	24,7	25,2	24,9	25,2	26,3	27,2	27,1	26,6	25,9	25	23,9	23,2	23	22,8	22,7	22,6

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																									
İstasyon Adı: GÖZTEPE													Ay: AĞUSTOS												
Günler	SAATLER																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	22,3	22	21,9	21,8	21,7	22,9	24,3	25,2	26,3	26,2	25,4	27	27,5	28	27,2	27	26,2	25,6	24,8	24,1	24	23,8	23,6	23,3	
2	23,1	22,7	22,4	22,2	22	22,6	24	25,4	26,8	27,6	28	28,5	28,5	28,8	28,6	28	27,2	25,8	25	24,8	24,4	24	23,8	23,8	
3	23,7	23,5	23,7	23,6	23,2	24	24,8	26,3	26,8	27,2	27,8	28,2	28,5	28,2	28	27,2	26,7	26	25,2	24,8	24,8	24,4	24,2	23,8	
4	23,7	23,5	23,3	23,2	23	23,4	24,2	25	26,5	27	27,6	27,4	27,5	27,6	27,4	27	26,2	25,1	24,4	24	23,8	23,6	23	22,8	
5	22,7	22,6	22,5	22	21,9	22,6	24,4	25,5	26,2	26,8	27	27,6	27,9	27,8	27,5	27	26,4	25,3	24,4	23,9	23,8	23,3	23	22,6	
6	22	21,4	21	21	21	21,2	23,3	25,3	25,8	27,2	27,8	28,2	28,5	28,5	28	27,7	26,6	25,4	24,5	23,8	23,4	22,8	22,5	22	
7	21,8	21,4	21,3	21	20,2	21	24	25,5	26,2	27,6	28,5	29	29,2	28,8	28,5	27,8	27	26	25,8	24,2	23,8	23,2	22,9	22,4	
8	22	21,4	20,5	21,4	20,9	21,8	23,4	26,2	27	28,3	29,2	29,4	29,8	30	29,7	28,8	27,4	26,5	25	24,4	24	23,8	23,7	23,6	
9	22,7	22,2	22	21,8	21,2	21,7	23,6	25,6	26,8	26	26,4	27,3	28	31,5	31,2	30,8	29,8	28,1	26,5	25,2	24,4	24,2	24	23,4	
10	23	22,9	22,8	22,5	22,1	22,1	24	25	27,3	28,6	30,3	31	31,7	32,2	32	31,2	30,1	29	27,5	26,1	25,5	25	24,6	24,3	
11	24	23,4	23,1	23	22,8	23	24,4	25,6	27,5	29	30,8	31,7	30,1	28,8	31	31,1	31	30	28,1	27	25,9	25,7	25	24,8	
12	24	24	24	23,2	23	23	24,6	25,8	27	28,8	30	30	31	31,2	32,9	32	31,2	29,9	28	27	27	26,7	26,1	26	
13	25,5	25	24,9	24,9	24,8	24,8	25,8	27	28,6	28,5	28	29	31,5	32,8	32,7	32,2	31,5	30	29	28	27,5	27,2	26,9	26,7	
14	26	25,7	25,5	25,3	25,4	25,5	26,1	26	26,2	27	28,2	27,9	28,3	28,7	28,3	28	27,5	26,5	25,5	24,9	24,6	24	23,9	23,9	
15	24	23,6	23,3	23	22,5	22,7	25	26,3	27	27,2	28,3	28,5	27,7	28,4	28,6	27,4	27,5	26,5	25,5	24,9	24,6	24	23,8	23,5	
16	23	22,8	22,2	22,3	22,3	22	23,8	25,9	27,3	27,8	28,2	29	29,3	29,4	29	28,3	27,5	26,5	25,5	24,9	24,6	24	23,8	23,4	
17	22,9	22,6	22,2	22,1	22	22,1	24	26,1	27,4	28,8	29,5	30,2	30,4	30,6	30,4	29,8	28,9	27,4	26	25	24,6	24	23,6	23,2	
18	23	22,6	22,4	22	21,9	22	24,2	26	27,4	29,2	30,2	31	31	30,8	30,8	30	28,8	27,4	26	25,6	25,2	25	24,8	24,7	
19	24,3	24,2	24	23,9	24	24	25,6	26,2	26,8	27,2	29	29,8	30,4	31,2	30,4	30	29	28	26,8	26	25,8	25,6	25,3	25	
20	24,7	24	24,6	24,3	24,1	24,2	25	24,9	25,4	26	28	29	30,4	30,6	29,8	29,4	28,5	27	26,2	25,6	25,4	24,8	24,6	24,2	
21	24,1	24	23,7	22,8	23	23	24,6	25,8	27,6	27,6	28	27,2	29	29,4	30,2	32	31,8	30	27,6	26	25,6	25	24,8	24,4	
22	24	24	24,6	25,8	26	25,5	26,1	26,6	28	29,7	31	33	33,5	32,3	31,4	29,2	28,4	27	26,2	26	25,8	25,8	25,7	25,8	
23	25,4	25	25,6	25,2	24,9	24,3	24	24,5	24,9	25	25,5	25,2	25,1	25	24,8	24,2	24,1	23	22,8	22,8	21,1	21,4	22	22,2	
24	22,4	22,5	22,6	22,2	22,1	22,2	23,1	24	22	22,7	22,4	22,8	21,5	20,8	21,8	22,5	22,6	21,4	21	21,4	21,5	21	20,8	18	
25	17,8	17,9	18,1	18	19,2	19,8	20	23	22,6	21,5	23,2	22,6	22	20,4	21,3	21,8	22	21,8	20,6	18,7	18,6	18,6	18,1	17,6	
26	16,9	16	15,8	15,4	15,2	16	18	20,2	22,4	23,8	24,2	23,8	24,4	24,2	24	23,5	22,7	22	21,2	20,6	20,2	19	18,7	18,2	
27	17,5	17,3	17	17,9	16,5	14,8	15,5	15,4	16	16,3	16,5	18,3	19,4	18,8	20,1	20,8	20,9	20,4	19,8	18,6	18,3	17,5	16,4	17,8	
28	17,7	17,7	17,4	17,2	17	17,2	17,8	18,2	20,2	21,9	22	22,8	23	23,6	23,4	22,8	22,9	21,9	21	19,8	19	18,8	19,2	18,7	
29	18,9	18,4	17,8	17,2	17,8	18,2	19,4	21	22,2	23,2	22,2	23,4	25,8	26	25,6	25,2	24,8	23	22	21,3	20,6	20	19,6	19,2	
30	19,6	19,1	19	19	18,9	19	20,2	21,8	23,4	24,8	25,4	25,8	25,6	25,8	25	24,8	23,4	22,8	22	21,2	20,8	20	19,6	19,4	
31	19,2	19	18,8	18,4	18	18	19,8	22	23,4	25	26,2	26,2	26,8	27	26,2	26	24,8	23,2	22,2	22	22	21,6	21,2	21	

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: EYLÜL												
SAATLER																								
Günler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	20,7	20,2	19,9	19,4	18,9	19,2	20,6	23	22	23	24	24,8	26,2	26	26,4	25,8	25	24	23,1	23	22,8	22,4	22	21,8
2	21,4	21,4	21,5	21,3	20,8	20,4	20,2	20	18,8	18,9	19,4	20,2	21,6	23,2	23,4	23,6	23,2	23	22	21,6	20,6	20,5	20,1	19,8
3	19,5	19,6	19,2	19,1	18,9	18,6	19	20,2	23,1	24	24,6	25,2	26,5	26,8	25,4	25,1	24	23,2	22,6	22,5	22,6	22	21,7	21,6
4	21,6	21,4	21,5	21	21	21	22	22,4	23,2	24	24,9	26	26,2	27	26,8	26,4	25	24	23,3	23	22,4	17,5	17,3	17,3
5	17,6	18,4	18,5	18,8	18,6	18,4	18,8	19,2	20,4	20,9	21,6	22,4	22,4	23,1	21,2	21,5	19,2	18	17,9	18,6	19,2	19,1	19,1	19
6	19,1	19	18,1	17,5	17,4	17,2	17,8	19	20,2	22	22	22	22,5	22,2	23	22,2	21	20,2	20	19,2	18,6	18	17	17
7	18,8	18,8	18,5	17,9	16,2	16,5	17,7	19	19,8	20,2	21	22	22	22,2	22,7	22,5	22,3	21	20	19	18,2	18	17,6	17
8	16	16,2	15,8	15,8	15,5	16	17,8	19,2	21	22	22,8	22,5	22	22	22,2	22,3	22	22	20,8	20	19,8	19,2	18,6	18
9	17	17	16	16	16	16	17,6	20	22	23	23,5	24,2	25,5	25,6	26	25,8	24	23	22,2	21,8	21	20,8	20	19,8
10	19,2	19	19	19	19	19,1	20	21,8	22,9	21,9	22	23	23,5	23,6	23	22,9	22	21	20,2	20	19,8	19,5	19,2	19
11	18,8	18,8	18,2	18,2	18,2	18,3	19,4	21	22	22,8	24,2	24,3	24	24	24	23	22	21,5	21	20,8	20,5	20,2	20	20
12	19,6	19,2	19	19	18,9	19	19,8	21	22	23	23	23	23,5	23,6	23,5	23	22,2	21,8	21	20,8	20,3	20,2	20,1	20
13	20	19,8	19,2	19	18,6	18,2	18,6	19,8	20,8	21,8	22,2	22,4	22,5	23,1	22,2	21,8	21	20,2	19,8	19,2	19	19	18,5	17,2
14	16,8	17,5	17,6	17	17	17	19,2	19,3	20	21	21	22,2	22,2	22,4	21,8	21,2	20,4	19,4	18,8	19,2	18	17,4	16	16,2
15	15,8	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,8	19	21	22	23	23	24	24,2	23,8	23,6	23	22,4	21,4	20,6	20	18,8	18,2	18,2
16	18	17,8	17	16,2	16	16	17,2	19,8	22	23	23,8	24,6	24,8	25,2	25	24,4	23,5	21,2	20	19,6	19,4	18,8	18,4	18
17	17	16,7	16	16,6	15,2	16	16,7	19	21	23,3	24	24,6	25	25	24,4	23,4	22,4	20,8	20	19,5	19	18,4	18	17,6
18	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,4	18	20,2	21,5	22,3	23,8	23	24	23,2	22,8	22	22	20,8	20	20	19,8	19,7	19,6	
19	19,2	18,9	18,4	18,6	18,5	18,6	20	21,4	22,2	23,2	24	24,8	25,2	25	24	23	22,2	21,8	21	20,9	20,8	20,6	20,2	20
20	19,8	19,8	19,9	20	19,9	19,8	20,4	20,6	20,7	21,7	21,7	22,8	22,6	23,2	22	21,8	20,6	20	19,3	18,8	18,6	17,9	17,7	17,5
21	17,6	17,4	16,7	16,8	17	17,2	18	19,4	20,5	21	22,2	22,4	22,6	22,2	21,8	21,2	20,6	19,2	18,7	18,1	18	17,2	16,8	16,5
22	16	15,8	15,3	13,9	13,4	14	15,4	18	19,6	21,4	22,3	23,5	24,2	24,4	23,6	22,4	21,4	20,2	19,4	18,8	18,7	18,2	18	17,5
23	17,2	16,9	16,4	16	15,8	15,7	17,4	19	20,2	20,6	22,3	23	23,2	24	23	22,2	21	19,5	18,8	18,2	18,4	17,5	17	16,9
24	16,3	16	15,8	15,3	15,1	14,8	16,4	19	20,5	21,8	23,2	23,6	23,8	24	23,2	22,3	20,8	19,4	18,6	18,1	18	17,2	16,6	16
25	15,4	14,9	14,4	14,8	15	15,2	16,1	18,9	20,2	22,2	23,8	24,4	24,7	25	24,5	23,2	22	20,4	19,8	19,2	18,8	18,2	17,9	17,4
26	16,8	16,7	16,5	16,4	15,9	16,3	17,4	19,8	22,4	23	25	24,5	26,8	26,8	27,8	27	25,2	23,2	22,2	21,5	20,8	20	19,4	18,8
27	17,8	17	16,5	16	15,8	16	17,2	20,3	22,4	24,2	25,1	26	26	27,8	26,5	23,8	23	24	23,9	21,2	21,4	19,3	18,2	18
28	17,3	16,4	16,1	15,8	16	17	20	23,2	25	26,4	27	27,6	27,2	27,5	26,4	26,6	26	24,3	23,2	21,8	20,6	19,2	19	18,9
29	18	18	17	17	17,3	17,4	18,6	21,6	23,6	23,5	25	25,6	26	27	26	25	25,4	23	22,3	22	21,6	21,9	20,6	22
30	22	21,7	21	20,6	20,3	20	20,8	21,5	21,9	21,9	22	22,7	23	23,2	23,2	22,8	21,5	20,9	20,7	20,3	20,2	19,8	19,5	19,2

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																									
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: EKİM													
Günler	SAATLER																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	19	18,8	18,3	18,3	18,2	18,8	19,8	20	21,5	21,7	23,8	23,6	25	23,6	22,9	22,2	21	20,5	20	19,8	20	19	19	19	19
2	18	17,4	17,7	18	17,6	17,4	18	19,3	20,2	21	21,1	22	22,5	23,2	22,4	22	22	21,2	20	19,7	19,4	18,7	18,4	18	
3	17,8	17,4	17	17	16,6	16,2	16,8	18	20	21,1	22	22	22,8	24	24	23,3	23	22	21,2	21	21,2	20,2	19,6	19,2	
4	18,8	18,5	18	17,5	17,3	17,2	17,8	18,4	21	24	26	26,9	27	26,5	26,5	25,5	23,3	21,7	20,7	20,6	20,2	19,8	19,6	19	
5	18,8	18,6	18,3	18	17,8	17,6	18,8	21	21,5	23	23,9	23,9	24	25	23,2	23	22	21,2	21	21	20,8	20	19	18,3	
6	18	18	18	17,9	17,8	17,8	18,5	20,2	22,2	23,2	24,2	24,8	25	26	25,2	25,2	24,2	22,2	21,2	21	20,8	20,2	20,2	19,8	
7	19,5	19,2	19,8	20,2	20,3	20,2	20,3	21,3	21,8	22,3	23,8	24,2	24	24	23,6	23,2	22	21,3	20,8	20,5	20,5	20,5	18	17,2	
8	16,7	16,2	16,3	16,2	15,5	15,2	15,6	15,8	15,9	14,9	14,9	15	14,5	15,4	15,8	15,8	15,8	15,8	15,7	15,5	15,5	15,4	14,7	15,3	
9	16	16	16	15,9	15,7	15,7	15,4	15,5	16	16,5	16,8	16,7	16,2	15,2	15,3	15,6	15,7	15,7	15,5	15,5	15,4	14,7	15,3	15,3	
10	14,3	14,3	14,3	13,6	13,9	13,3	12,5	15,2	17	17,2	18	18,2	18,2	19	18,8	18,7	17,2	16,2	15,3	14,5	13,4	12,3	12,5	12,7	
11	14,2	16	16,5	16,2	14,5	14,5	15	15,1	17,3	17	17	17	16,5	16,9	16,5	16,3	16,1	15	14	13,5	13,4	12,8	11,8	11,7	
12	11,3	10,5	10,2	10	10,7	10,4	10,8	13,2	16,4	17,4	18,5	19	19,2	19,7	20	20	18,3	17,2	16	15,2	14,6	13,7	13	12,8	
13	12	11,6	11,6	11,5	11,4	11	11,4	14,2	17,6	18,8	20	21,2	20,7	20,8	21	21,3	20,2	18,7	17,6	16,8	16,4	16,2	15,6	15,2	
14	15	14,9	14	13,2	13,1	13	13,5	15,8	18,3	20,2	20,8	21,8	21,4	21,8	22,7	21,8	20,8	19	18	17,3	16,8	16,2	16	16,1	
15	16,2	16,2	16,2	15,8	15,7	15,2	15,4	15,9	17,2	18,2	18	17	18	16	15,2	14,2	14	14	14,2	14	12,6	12,5	11,2	10,9	
16	10,5	11	10,7	10,4	10,8	10,5	10,4	12,8	14,8	16	17	16,5	17,6	17,6	16,8	15,6	15	14,5	14,4	14,2	14,4	14,3	14,2	13,8	
17	13,4	13,2	13,2	13,3	13,8	13,8	14,2	13,5	13,3	13,8	14,4	15	15,4	15,8	15,6	15,4	14,8	14,2	14,1	13,5	12,8	12,2	11,8	11,2	
18	10,5	10,3	11,1	10	10,2	10,3	12	13,1	14,8	16	16,1	16,1	15,8	15,8	15,4	15	13,8	13	12,7	12,2	11,8	11,9	11	11	
19	11	10,8	10,8	11	11,1	11,2	12	12	12,6	13	13,2	13,2	13,7	14	14,1	14,3	14,4	13,7	13,8	14	14,8	14	16	16	
20	15,8	15,9	15,9	15,5	15,2	15	15,3	15,3	16	16,1	16	16,7	16,8	17	16	15,8	15,3	15	14,8	14,6	14,4	14,2	14,2	14	
21	13,9	13,9	14	14	14	14,1	14,4	14,4	14,8	14,3	14,8	15	15,4	16,2	16,2	16	15,6	14,8	14,6	14,2	14,3	13,8	14	14	
22	13,9	14	14	14	14,1	14,3	14,8	15	15,3	15,7	16	16,4	16,2	16,3	15,7	14,9	14,4	14	13,8	13,6	13,4	13,4	13,2	13,6	
23	14	14,2	14,3	14,3	13,8	13,8	14	14	15,2	15,4	15,6	16	16,3	14,9	14,7	14,5	14	13,4	13,6	13,4	13,3	13,2	13,3	13,3	
24	13,3	13,3	13,3	13,4	13,4	13,4	13,6	14	15,2	15,3	16	17	17,6	17,2	17	16,4	15,6	15,4	15,2	15	14,7	14,8	14,8	14,2	
25	14,3	14,4	14,4	14,4	14,4	14,6	14,6	15,4	15,9	18,2	19,2	19,9	19,2	19	19,1	18,4	18	17	15,2	14,8	14,6	14	13,8	13,4	
26	13,3	13,2	12,5	12	11,8	11,3	11,5	15	17,6	18	18,2	18,6	18,8	19,5	19,4	18,5	17,2	16,4	15,5	15	14,6	14,5	15	14,2	
27	13,9	13,3	13,2	13,2	13,2	13,8	14,8	16	17,4	18,1	19	19	19,6	19,5	19,4	19	18	17,8	17,7	18	18,5	16	15,5	15,2	
28	14,8	14,7	14,6	14,4	14,8	14,6	14,8	15,2	16	16,8	17	17,4	17,4	17,8	17,2	16,7	15,3	14,8	14,2	13,8	13	12,4	12,2	12,2	
29	11	11	10,4	10,2	10	10	10,7	13	15	16	16,8	16,4	17	17,8	17,2	16,7	16	15,2	14,4	14	14,2	13,3	12,4	12,6	
30	12,2	12,2	11,6	11,4	11,7	12,4	12,6	12,6	13	13	13,7	14,2	14,7	15,8	14,2	14,2	13,5	13,2	12,8	12,4	12	10	9,2	10,2	
31	10	10,2	10	9,4	10	10,2	10,6	11	13,5	14,9	14,2	15	16,4	16,8	16,3	15,8	15	13,4	13	12,3	11,6	10,4	10	9,2	

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																										
İstasyon Adı: GÖZTEPE													Ay: KASIM													
Günler	SAATLER																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	9,2	8,8	8,8	9	8,7	9,2	9,7	10,7	14	15,9	16,5	16,5	16,9	16,6	16,2	16,2	15	14,5	14,3	14,9	15	14,9	14,9	14,2		
2	14,1	14,1	14	13,5	13,3	13	12,8	13,5	14,5	14,8	15,5	15,6	15,5	15,4	14	13,8	13,4	13,3	12,9	12,8	13	13	12,9	12,8		
3	12	11	11,6	11,5	12,2	12,1	12,4	13,6	15,8	16,9	17,7	18,2	18,9	19	18	16,8	16,5	15,2	14,5	14,2	13,8	13,6	13,6	13		
4	13,2	13	12,6	12,8	12,8	13	13,2	13,9	15,5	16	16,2	16	16	16	15	14,4	14,3	14,5	14	14	14,5	14,5	14,4	14,2		
5	14,2	14	13,5	13,4	14	14,2	14,2	14,2	14,2	15,2	16	15,2	16	15,2	14,8	14,4	13,9	13,9	13,9	13,8	13,6	13	12,9	12,8		
6	12,1	12,2	12	11,9	10,5	10	9,6	12	14	14	15	15,2	15,8	16	15	14	13	12,2	12,2	12	11,8	11,4	11,2	11		
7	10,5	10,4	10,2	10,2	10,1	9,6	9,6	10,3	13	15	16,3	16,3	16,9	17,4	17	16	14	13,4	13	13	12,6	12,2	12	12		
8	12	12	11,2	11	11	11	10,8	11	13,5	15,2	16,4	17	17,2	16,5	16,2	15	14,6	14,2	14	14	14	13,8	13,8	13,7		
9	13,6	13,5	13,8	13,9	13,9	13,9	13,8	14	14,1	14,7	14,9	14,5	13,8	13,5	12,8	12,8	12	11,8	11,4	11,2	11,2	10,8	10,6	10,2		
10	10,1	10	9,8	9,5	9,4	9,5	9,6	9,9	10	10,1	10,2	10,1	10	10,3	10	9,9	9,8	9,9	9,9	10	10,1	9,7	9,6	9		
11	8	7,7	6,6	6,3	6,5	5,3	6,2	7,2	9,5	11,2	13	13,6	13,8	13,9	13,6	12,7	11,6	10,8	10,6	10	9,8	8,8	9	9,8		
12	10	10,1	10,4	10,6	10,8	10,9	11,2	11,2	11,4	10,3	10,1	9	8,2	8	8,2	8,3	8,5	8,6	8,8	9,2	10	10	10,5	10,5		
13	10,2	10	10	9,9	9,8	9,7	10	10	10,1	10,7	11,3	11,9	11,7	11,4	11	10,5	9,6	9,4	9,3	8,8	8,5	8	7,8	7,3		
14	6,5	6,4	5,8	5,5	6	7,2	8	10,3	11	11,4	12,1	12,2	12,9	13,4	13	12	11,6	11	10	11,6	12,4	12,7	12,7	12,5		
15	12,6	11,2	11	11	10,4	11,4	12	13	13,8	14,6	15	15,3	15,5	15,2	15,4	15,3	15,6	15	14,8	14,6	15,4	15,4	16	15		
16	15,2	16	16	15,8	15,8	15,3	12,5	12	11,6	11	11	11	10,5	10,2	10	10,2	10	10	10	10,3	10,5	10	10,2	10,2		
17	10,4	10,2	10,4	10,5	10,6	10,8	10,8	11	12	12,8	13,5	16	17	17	16,8	16	15,2	15,8	17	17	16,9	17,2	17	16,9		
18	16,7	16,9	16,7	17	17	17	17,3	17,6	17,7	17,7	18	16	15,6	14,4	13,7	13,6	13,2	13	13	13	13,2	13,4	13,8	13,8		
19	14,1	14	14,1	14,1	14	14	13,8	12,3	13	13,8	15	16,6	16,8	17,2	17	16	15	14,6	14,7	14,1	14,7	14,2	13,7	15		
20	14,3	14,3	15,2	14,2	14,3	14,4	15	15,2	15	15	15,2	15	15,4	15,4	15	15	14,7	14,3	14	14	14	13,4	13,2	13		
21	13	13,1	12,5	12,3	12	12	12	12,1	13	13,4	14,2	15,1	16,3	16,8	16,8	15	13	12,8	12,3	12,3	12,4	12	11,8	11,4		
22	11,3	11,8	11,8	12	12,2	12,6	13,2	13,2	14	15,5	18,8	20	21,3	21,4	20,1	19,4	18,7	17,8	18	17,3	18	18,2	18,4	18		
23	17,6	17,9	17	18,1	17,5	17,3	17,3	17,3	19,5	19,8	18,9	17,1	16,2	15,6	14,3	14,2	14,1	14	14,7	14,2	13,2	12,1	11,1	11		
24	10,4	10,2	9,7	9,4	9	8,4	7,6	6,9	5,7	5,5	4,7	4,1	4	4,5	5	5	5,1	5,3	5,7	5,8	5,8	5,7	5,5	5,8		
25	6	5,7	5,2	4,9	4,3	4,2	4,2	4,4	5,4	4,6	4,6	5,8	5	5	4,2	3,2	3,4	3,6	3,8	3,7	3,8	3,4	3,4	3,2		
26	2,2	2,2	2,3	2,1	1,7	1,7	2	2,5	2,4	3	4,1	3,6	3,3	4	4,2	4	3,2	3,2	3	3	2,9	3,2	3,3	3,5		
27	3,5	3,5	3,5	3,4	2,8	2,4	2,6	2,5	4,1	5,2	6,4	7,2	7,3	8,2	7,6	6,7	5,6	5,2	4,3	4,2	4,5	3,9	3,3	3,2		
28	2,7	2,7	2	0,8	0,9	0,1	1,7	2,1	5,6	7,1	8,4	8,7	9,4	10,3	10,2	9,4	8,5	8	7,5	7,6	6,7	6,3	6,2	6,2		
29	6,1	6,2	5,5	5,4	5,3	5,2	5,5	6,3	7,7	10	10,8	10,9	10,2	10,6	10,5	10	9,7	9,2	8,2	7,9	7,6	7	6,8	6,5		
30	6,2	6	5,8	5,4	5,8	4,8	5	5,1	7,6	8,9	10,2	11,3	12,1	12	11,8	10,4	9,1	8,4	8	7,1	7	5,1	5,1	5,1		

Ek 3. İstanbul/Göztepe için Meteoroloji Müdürlüğü'nce Ölçülen Saatlik Hava Sıcaklıkları. (Devam)

1999 YILI SAATLİK HAVA KURU HAVA SICAKLIĞI (°C) TABLOSU																								
İstasyon Adı: GÖZTEPE												Ay: ARALIK												
Gnler	SAATLER																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	5,8	5	4	4,2	3,8	4,2	4,2	5	8,5	9,8	10,2	11,5	12,5	12,5	12	10	8,2	7	6,5	6,3	6,4	6	8,5	10
2	10,9	10	8	10	10,2	10,1	10,4	10,6	11,5	11,8	13	13,2	13,9	13,2	13,2	12	11,5	10	10,5	10	10,3	9,9	11	11,2
3	11,2	11,2	11,5	12	12	12	12,4	12,1	12,2	12,8	13,5	13	12,8	13	13,2	12,3	11,3	10,8	10,3	10	9,4	9	8,2	7,2
4	7	6,2	6	7	7,2	7,2	7,2	8	9,2	10,2	12,8	13,8	13,2	14,2	13,9	13	12,8	13	12	11,5	11,7	11,3	12	12
5	11,3	10,5	10,8	11,5	10,8	10,4	11,1	11,5	13	13	13,5	15	15,9	15	15	15	15	15	14	13,9	13,5	13,5	13,2	12,9
6	12,8	13	13	13	12	12	11,6	12,2	13,2	14,9	15,8	17,4	17,6	14,3	10,5	9,6	9	9	9	8,3	8,2	8	7,7	7,6
7	7,6	7,9	7,9	8	7,7	7,8	8	8,2	8,6	8,7	9	9,8	9,6	9,6	9,1	8,9	8,5	8,4	8,1	7,9	7,8	7,4	7,2	7
8	6,7	6,2	6,3	6	5,5	6,4	6,2	7,5	8,4	10	10,3	10,1	10,2	10,8	10,7	10,3	10,4	10,8	11	11,2	11,4	10,9	11,1	11,3
9	11,2	11,1	10,9	10,4	10,2	10,1	10	9,4	10,1	11,5	12,1	12,4	12,8	13,6	13,1	12,3	11,2	10,1	9,8	8,9	9	7,9	7,1	7,8
10	8,2	7	6,8	6,7	7	8,2	10	10,4	11	12	11,9	11,9	12,1	12,3	12,3	12,2	12,3	12,3	12,2	12,1	12,4	12,4	12,2	12,2
11	11,4	11,3	11,2	11,2	11,1	10,1	9,3	11,1	12,3	14	14,1	14,1	15	15,9	16	15,3	13,9	14,2	14,3	14,4	14,2	13,8	13,8	13,8
12	13,3	14	14,2	14,1	13,9	13,4	13,2	13,6	15,1	16	18	17,2	16,3	14,8	13,7	13,6	13,2	13,1	12,9	13	12,5	13,2	13,1	12,8
13	12,2	12,1	11	10	9,9	9,4	9,2	9,2	11,2	12,8	13,5	14	14,2	14,3	14,2	13	12,4	12	12	11,8	12,7	12	11	11,8
14	11,2	11,3	11,4	12	11,8	10	10	9	7,4	7,2	8	10	9	10,5	10,2	10	9,3	9	8,8	8,6	9,7	9,4	9,6	9,3
15	9,1	9,1	9	9	9,2	9,6	10,2	10,3	10,8	11,6	12	13	13,4	14,4	13	13	13,5	13,2	13	13,3	14	13,7	13,6	13
16	14	15,1	14,2	14,2	13,9	14,1	14,2	14	14,1	14,5	15	15,3	15,8	16	16,6	15,7	15,3	15,2	14,8	14,3	14,7	13,8	13,6	13,4
17	14	13,2	13,2	13	13,8	13,3	13,1	12,9	14	15	16,6	17	17	17,5	17,3	17	15,6	15	14,6	13,8	12,8	12	11,8	10,9
18	10,9	10,3	10,1	10	10,9	10	11,4	11,2	12,6	14	14,6	14,2	14,4	14,6	14,4	14,8	13,8	12,2	11,6	12,2	12,2	11,2	11,1	11,3
19	10	9,4	10,1	10	10	10,2	10,2	9,2	11	13	14,2	14,2	15,2	14,6	14,2	13,3	11,8	10,5	10	9,6	10,6	11	11,8	12
20	11	11	11,3	11,8	11,2	11,6	12,2	11,8	12	12,8	13,8	13,3	14,8	15,5	15	14,9	14	14	13,9	12,4	14,4	14,9	14	13
21	12,2	14,4	10,7	11	12,8	12,2	12,4	13	13	13,1	13,1	13,1	9	8,1	7	6,2	6	6	6,2	6,2	7	6,8	6,9	7,1
22	7,1	7	6,9	6,6	6,4	6,2	6,4	6	5,8	5,7	5,5	5,3	5,1	5	4,8	4,7	4,8	4,8	4,9	5	4,5	3,9	3,6	3,4
23	3,5	3,9	4,2	3,8	4,1	4,2	4,2	3,4	3,8	4,2	4,4	4,4	4,3	4,3	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,5	4,6	4,7	4,7
24	5	5	4,9	4,5	4,5	4,5	4,6	4,4	4,5	4,5	4,6	4,6	4,7	4,6	4,8	5,1	5,4	5,4	5,7	5,7	5,6	5,5	5,9	6
25	6	6,2	6,1	6,1	5,4	5,4	6,1	5,5	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	5,5	5,4	5,4	5,4	5,4	5,5	6	5,6	5,6	5,4
26	6	5,6	6,1	6,6	7	7,2	8	8,2	8,3	8,5	8,7	8,7	9,2	10	10,2	10,2	10,2	10,2	10,3	10,4	11	11,2	11,4	11,4
27	11,4	11,7	11,8	11,8	12,4	12,6	13	12,9	13	13,7	13,7	13,8	13,8	14,4	14,3	14,2	14,6	14,4	15,2	14,7	15	14,2	14	10
28	10	11	10	9,5	9	9,6	8,6	9,6	10,8	11,8	13	15,2	15,1	15,4	15,8	15,9	14,9	14,3	14,3	15	15,5	15	16,3	15,8
29	15,8	15,9	15,9	15,5	15,2	11,7	11,9	12,3	13,2	13	12,7	13	13,5	13,6	13	12,8	13,3	13,2	13,7	12,8	12,4	12,6	12,1	12,1
30	12,3	12,1	12,1	11,8	11,8	11,2	11	9,9	10,4	11,2	12	13,8	13,9	14	12,4	10,8	9,7	9	8,9	8,9	8,8	8,4	8,3	
31	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,8	9	8,5	8,1	8,2	8,7	9	9,4	9,9	10	10	10	10	10	10	10,2	9,3	9	10

Ek 4. Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri.

Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri						
n Proje Ömrü (yıl)	$1 - [(1 + F_0)/(1 + i)]$					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1	0,952	0,909	0,87	0,833	0,8	0,769
2	1,859	1,736	1,626	1,528	1,44	1,361
3	2,723	2,487	2,283	2,106	1,952	1,816
4	3,546	3,17	2,855	2,589	2,362	2,166
5	4,329	3,791	3,352	2,991	2,689	2,436
6	5,076	4,355	3,784	3,326	2,951	2,643
7	5,786	4,868	4,16	3,605	3,161	2,802
8	6,463	5,335	4,487	3,837	3,329	2,925
9	7,108	5,759	4,772	4,031	3,463	3,019
10	7,722	6,145	5,019	4,192	3,571	3,092
11	8,306	6,495	5,234	4,327	3,626	3,147
12	8,863	6,814	5,421	4,439	3,725	3,19
13	9,394	7,103	5,583	4,533	3,78	3,223
14	9,899	7,367	5,724	4,611	3,824	3,249
15	10,38	7,606	5,847	4,675	3,859	3,268
16	10,838	7,824	5,954	4,73	3,887	3,283
17	11,274	8,022	6,047	4,775	3,91	3,295
18	11,69	8,201	6,128	4,812	3,928	3,304
19	12,085	8,365	6,198	4,843	3,942	3,311
20	12,462	8,514	6,259	4,87	3,954	3,316
21	12,821	8,649	6,312	4,891	3,963	3,32
22	13,163	8,772	6,359	4,909	3,97	3,323
23	13,489	8,883	6,399	4,925	3,976	3,325
24	13,799	8,985	6,434	4,937	3,981	3,327
25	14,094	9,077	6,464	4,948	3,985	3,329

Ek 4. Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri. (Devam)

Bugünkü Değer Çarpanının Çeşitli Değerleri						
n Proje Ömrü (yıl)	$1 - [(1 + F_g)/(1 + i)]$					
	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,3
1	1,053	1,111	1,176	1,25	1,333	1,429
2	2,161	2,346	2,561	2,813	3,111	3,469
3	3,327	3,717	4,189	4,766	5,481	6,385
4	4,555	5,242	6,105	7,207	8,642	10,55
5	5,847	6,935	8,358	10,259	12,856	16,5
6	7,207	8,817	11,01	14,073	18,475	25
7	8,639	10,908	14,129	18,842	25,966	37,142
8	10,147	13,231	17,799	24,802	35,955	54,489
9	11,733	15,812	22,116	32,253	49,273	79,27
10	13,404	18,68	27,196	41,566	67,031	114,671
11	15,162	21,866	33,172	53,208	90,708	165,249
12	17,012	25,407	40,202	63,76	122,277	237,492
13	18,96	29,341	48,473	85,949	164,37	340,703
14	20,011	33,712	58,203	108,687	220,493	488,147
15	23,169	38,569	69,651	137,109	295,324	698,781
16	25,441	43,966	83,119	172,636	395,098	999,688
17	27,833	49,962	98,963	217,045	528,131	1429,554
18	30,351	56,625	117,604	272,556	705,508	2403,649
19	33,001	64,027	139,534	341,945	942,011	2920,927
20	35,79	72,253	165,334	428,681	1257,347	4174,181
21	38,72	81,392	195,687	537,101	1677,797	5964,544
22	41,817	91,546	231,397	672,626	2238,395	8522,226
23	45,017	102,829	273,408	842,033	2985,861	12176,01
24	48,496	115,366	322,833	1053,791	3892,481	17395,73
25	52,101	129,296	380,98	1318,489	5311,308	24852,47

Ek 5. Boru Özellikleri ve Fiyatları

Nominal Çap (inch)	Nominal Dış Çap (inch)	Yaklaşık İç Çap (inch)	Minimum Et Kalınlığı (inch)	Uzunluk (feet)	Yaklaşık Olarak 100feet borunun ağırlığı (lbs)	Birim Boy Fiyatı (\$/m)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
3/4	1,05	0,86	0,095	300,500,600	12	0,6	0,389
1	1,315	1,075	0,12	500	19	0,89	0,389
1 1/4	1,66	1,358	0,151	150,300,500	31	1,28	0,389
1 1/2	1,9	1,554	0,173	500	58,714	1,74	0,389
2	2,375	1,943	0,216	150,300 ,	64	2,4	0,389
3	3,5	3,048	0,226	-	102	4,66	0,389
4	4,5	3,92	0,29	-	168	7,32	0,389
6	6,625	5,771	0,427	-	363	17,06	0,389
8	8,625	7,513	0,556	-	616	-	0,389
crosslink	0,63	0,512	0,059	-	-	0,443	0,389

19.12.2000 Döviz kuruna bağlı olarak tezimizde 1\$=677500TL olarak alınmıştır.

Crosslink borular hariç diğer tüm boru Fiyatları ABD satış fiyatlarıdır.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 01.10.1975

Doğum Yeri Siegburg / Almanya

Lise 1989-1992 Pertevniyal Lisesi

Lisans 1993-1998 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum(lar)

1998-1999 ERA Şehircilik Mimarlık, Müşavirlik Ltd.Şti.

1999-2000 BESA Mekanik Ltd.Şti.

**YÜKSEK
MÜHÜR**