İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNALARDA KOMBİNE ISITMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayça ESEN

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Isı - Akışkan

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNALARDA KOMBİNE ISITMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayça ESEN
(503081104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Feridun ÖZGÜÇ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ (İTÜ)
Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ (İÜ)

OCAK 2011

ÖNSÖZ

Binalarda ısıtma sistemlerinin gelişimlerini hızla sürdürdüğü günümüzde, enerji kaynaklarının azalmasını önlemeye yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bunların başında yenilenebilir enerji sistemlerinin en yüksek verimli ve en az maliyetle tasarlanmasını sağlamak gelir.

Bu tez çalışmasında güneş enerjili ve ısı pompalı kaynaklı kombine sistemler incelenerek sistem davranışları ve performanslarının çeşitli parametrelere bağlı olarak simulasyonları yapılmıştır.

Bu çalışmada bilgilerini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ'e , sistemin bilgisayarda programlanmasında büyük katkısı bulunan arkadaşım Eser AYGÜN'e teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca maddi ve manevi destekleri ile daima yanımda olan aileme ve yanımda olan tüm değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Aralık 2010 Ayça ESEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Çalışması 2
2. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ **5**
2.1 Güneş enerjisinin karakteristikleri 6
2.1.1 Türkiye'de güneş enerjisi 6
2.2 Güneş Açıları 8
2.2.1 Esas güneş açıları 8
2.2.1.1 Deklinasyon Açısı (d) 8
2.2.1.2 Saat Açısı(h) 9
2.2.1.3 Enlem Açısı (e) 9
2.2.2 Türetilen güneş açıları 9
2.2.2.1 Güneş Zenit Açısı (z) 9
2.2.2.2 Güneş Yükseklik Açısı (y) 9
2.2.2.3 Gün Uzunluğu (t_g) 10
2.2.3 Eğik yüzeyin açıları 10
2.2.3.1 Eğim Açısı(s) 11
2.2.3.2 Güneş Azimut Açısı (a_g) 11
2.2.3.3 Güneş Geliş Açısı (g): 11
2.3 Güneş Saati (GS) 11
2.4 Yeryüzüne Gelen Güneş Işınımı 12
2.4.1 Atmosfer dışına gelen güneş ışınımı 13
2.4.2 Yatay Düzleme Gelen Aylık Ortalama Günlük Tüm Güneş Işınımı 14
2.4.3 Yatay Düzleme Gelen Aylık Ortalama Günlük Direkt ve Yayılı Güneş Işınımı 14
2.4.4 Günlük değerlerden saatlik değerler elde etmek 15
2.4.5 Yeryüzünde eğik düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınımı 16
2.4.5.1 Yeryüzünde eğik düzleme gelen anlık ortalama güneş ışınımı 16
2.4.5.2 Eğik düzleme gelen anlık toplam güneş ışınımı 16
2.5 Güneş Kolektörleri 17
2.5.1 Düzlemsel güneş kolektörlerinin elemanları 17
2.5.1.1 Saydam örtü 18
2.5.1.2 Yutucu yüzey (Absorber plaka) 19

2.5.1.3 Yutucu yüzeylerin kaplanması 20
2.5.1.4 Yutma-geçirme çarpımı 20
2.5.1.5 Kolektör kasası 21
2.5.1.6 Yalıtım 21
2.5.2 Kolektörlerin Isıl Analizi ve Modellenmesi 22
2.5.2.1 Kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları 25
2.5.2.2 Kolektör anlık verimi 25
3. DEPOLAMA 27
3.1 Isıl Enerji Depolama 28
3.1.1 Isıl Enerji Depolamasında Su Kullanımı 30
3.1.2 Karıştırılmış Depo 31
3.1.3 Geri Dönüş Suyu Sıcaklığı Tayini 32
3.1.4 Isı Değiştiricisi 34
4. ISI POMPASI 35
4.1 Isı Pompalarının Sınıflandırılması 36
4.1.1 Isı Kaynakları 36
4.1.1.1 Hava 36
4.1.1.2 Su 37
4.1.1.3 Toprak 37
4.1.1.4 Güneş 38
4.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemi İle İlgili Temel Kavramlar 38
4.2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Çalışma Şekli ve Elemanları 41
4.2.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi 42
4.2.1.2 Toprak Isı Değiştiricisi Türleri 43
4.2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası 45
4.2.2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları 46
4.3 Toprak Isı Değiştiricisi Tasarımı 48
5. SİSTEM MODELLEME 51
5.1 Bina Isıl Yükleri Hesabı 53
5.2 Kullanma Sıcak Suyu Yükleri Hesabı 55
5.3 Güneş Enerjili Aktif Isıtma Sistemi 57
5.4 Isı Pompası Sistemi 63
5.4.1 Isı pompası elemanları seçimi 64
5.5 Kazan seçimi 65
5.6 Çalışma Senaryolarına Göre Sistem Seçimleri 66
5.6.1 Güneş Enerjisi ve Kazan 66
5.6.2 Güneş Enerjisi ve Isı Pompası 68
5.6.3 Güneş Enerjisi ve Çift kaynaklı ısı pompası (Dual source) 69
5.6.4 Güneş Enerjisi, Isı pompası + Kazan 70
5.7 Ekonomik Analiz 71
5.8 Gerçek Isı Pompası Performansının Karşılaştırılması 75
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 81
KAYNAKLAR 83
EKLER 85

KISALTMALAR

ASHRAE : American Society of Heatin, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
COP : Isı pompasının performans katsayısı
DHW : Domestic Hot water-Kullanma Sıcak Suyu
DMİGM : Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
EİE : Elektrik İşleri Etüt İdaresi
GÖS : Geri Ödeme Süresi
GS : Güneş Saati
İYM : İlk Yatırım Maliyeti
LCC : Life cycle cost
MATLAB : Matrix Laboratory
NBD : Net Bugünkü Değer
NTU : Number of Transfer Units
TRNSYS : Transient System Simulation Program
TS : Türkiye Saati
YİYM : Yıllık İlk Yatırım Maliyeti
ZD : Zaman Düzeltmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri 7
Çizelge 2.2 : Bazı yutucu yüzey malzemelerinin ısı iletim katsayıları 19
Çizelge 2.3 : Bazı yalıtım malzemelerinin özellikleri 21
Çizelge 3.1 : Isıtıcı giriş sıcaklıklarının dış havaya göre değişimi 33
Çizelge 4.1 : Boru direnci (Miles, 1994) 49
Çizelge 4.2 : Toprak direnci (Miles, 1994) 49
Çizelge 5.1 : Kolektör alanı seçimi 57
Çizelge 5.2 : Sistemde kullanılan ekipmanlar 72
Çizelge 5.3 : Ekonomik analiz ve sistem karşılaştırmaları 73
Çizelge 5.4 : Seçilen ısı pompasının özellikleri 75
Çizelge 5.5 : Aylık ortalama toprak sıcaklıkları ve ısı pompası değerleri değişimi . 76
Çizelge 6.1 : Geri ödeme süreleri özet tablosu 81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Birim alana düşen yıllık güneş ışınımı değerleri(EİE) 7
Şekil 2.2 : Eğik düzleme gelen güneş açıları 10
Şekil 2.3 : Yeryüzüne gelen güneş ışınımı bileşenleri 12
Şekil 2.4 : Tipik bir düz kolektör 18
Şekil 3.1 : Güneş enerjisi düşük sıcaklık uygulamalarında depolama yöntemleri 29
Şekil 3.2 : Depo ve ısı değiştiricisi tipleri ile bağlanma şekilleri 34
Şekil 4.1 : Isı pompası prensip şeması 35
Şekil 4.2 : Yatay toprak ısı değiştiricili sistem 39
Şekil 4.3 : Düşey toprak ısı değiştiricili sistem 39
Şekil 4.4 : Toprak kaynaklı ısı pompasının sistem düzenleri 41
Şekil 4.5 : Paket tip toprak kaynaklı ısı pompası 46
Şekil 5.1 : Sistemin modeli 52
Şekil 5.2 : Energyplus programı arayüzü 53
Şekil 5.3 : Binanın 3 boyutlu çizimi 54
Şekil 5.4 : Binanın üstten görünüş kesiti 54
Şekil 5.5 : Yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı 55
Şekil 5.6 : DHW-calc programı arayüzü 56
Şekil 5.7 : Yıllık toplam ısıtma ve sıcak su ihtiyacı 57
Şekil 5.8 : Güneşten faydalanma oranının saatlik değişimi 58
Şekil 5.9 : Metrekare başına düşen saatlik ışınım ve faydalı enerji 59
Şekil 5.10 : Kolektördeki suyun sıcaklığının ortalama aylık değişimi 60
Şekil 5.11 : Kolektörden çıkan sıcak suyun sıcaklığının aylık ortalama yıllık değişimi 61
Şekil 5.12 : Kolektöre giren suyun sıcaklığının aylık ortalama yıllık değişimi 62
Şekil 5.13 : Aylara göre kolektör alanına bağlı olarak güneşten gelen faydalı ısının değişimi 62
Şekil 5.14 : Depo sıcaklığının çeşitli kolektör değerlerine göre değişimi 63
Şekil 5.15 : Sistem akış şeması 67
Şekil 5.16 : Depo sıcaklığına bağlı olarak kazanın yıl boyunca çalışma kapasitesi .. 68
Şekil 5.17 : Toprak kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin bir arada kullanıldığı durum için kompresör güç grafiği 69
Şekil 5.18 : Çift kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin depo sıcaklığına bağlı değişimi 70
Şekil 5.19 : Kombine kazan, ısı pompası ve güneş enerjisinin depo sıcaklığına bağlı değişimi 71
Şekil 5.20 : Yıl boyunca kompresör gücü ve COP değişimi 76
Şekil 5.21 : Yıl boyunca aylık ortalama toprak sıcaklığı ve COP değişimi 77
Şekil 5.22 : Binanın ısıtma ihtiyacı ve ısı pompasının verdiği ısının karşılaştırılması 77

Şekil 5.23 : Gerçek ısı pompası kompresör gücünün yıllık ortalama günlük değişimi 78
Şekil 5.24 : Tasarlanan ısı pompası ve gerçek ısı pompasının kompresörlerinin yıl boyunca saatlik güç değişimi 78
Şekil 5.25 : Isı pompasının güneş enerjisi destekli olması ve olmaması durumlarındaki COP değişimi 79

SEMBOL LİSTESİ

A_c : Kolektör alanı, m^2
d : Deklinasyon açısı,
h : Saat açısı,
e : Enlem açısı,
z : Zenit açısı,
y : Güneş Yükseklik açısı,
t_g : Gün uzunluğuı,
H : Güneşin doğuş ve batışındaki saat açısı,
s : Eğim açısı,
a_g : Güneş azimut açısı,
g : Güneş geliş açısı,
G_o : Atmosfer dışına gelen aylık ortalama saatlik güneş ışınımı,
I_{gs} : Güneş sabiti değerleri,
f : Güneş sabiti düzeltme faktörü,
Q_o : Atmosfer dışına gelen aylık ortalama günlük ışınım ,
I_o : Atmosfer dışına gelen aylık ortalama saatlik ışınımı,
K_t : Berraklık indeksi,
r_y : Yayılı ışınım oranı,
Q_y : Yayılı ışınım,
Q_d : Direkt ışınım,
I_y : Saatlik yayılı ışınım,W/m^2
I_d : Saatlik direkt ışınım, W/m^2
I_{ya} :Yansıyarak gelen ışınım, W/m^2
Q_u : Faydalı ısı ,W
F_R : Kolektör ısıl kazanç faktörü
U_L : Kolektörün çevre ile olan ısı kayıp katsayısı
m : Debi .kg/s
c_p : Isıl kapasite, J/kg.K
h_w : Rüzgara bağlı ısı taşınım katsayısı
V_r : Rüzgar hızı, m/s
N : Kolektörün cam örtü sayısı
T_o : Kolektör çıkış sıcaklığı, °C
T_i : Kolektör giriş sıcaklığı, °C
η_c : Kolektör verimi
ρ_s : Yoğunluk, kg/m^3
T_s : Depo sıcaklığı, °C
t : Zaman, h
Q_L : İhtiyaç için çekilen ısı,
Q_s : Depo çevresine ısı kaybı,
r_1 : Depolama tankının iç çapı, m
r_2 : Depolama tankının dış çapı, m
ε : Isı değiştiricisi etkenliği,

$\mathbf{T_{dip}}$ **:** Düşük toprak sıcaklığı, °C
$\mathbf{T_{mip}}$ **:** Yüksek toprak sıcaklığı,°C
$\mathbf{L_b}$ **:** Birim enerji başına toprak ısı değiştiricisi boru uzunluğu, m/kW
$\mathbf{L_{btop}}$ **:** Toprak ısı değiştiricisi boru uzunluğu, m
$\mathbf{T_{hemin}}$ **:** Toprak ısı değiştiricisi alt değer sıcaklığı,
$\mathbf{T_{hemax}}$ **:** Toprak ısı değiştiricisi alt değer sıcaklığı,
$\mathbf{R_b}$ **:** Boru direnci,
$\mathbf{R_t}$ **:** Toprak direnci,
$\mathbf{F_{pl}}$ **:** Isı değiştiricisi işletme faktörü
$\mathbf{Q_{kss}}$ **:** Kullanma sıcak suyu ısıl yükü, W
$\mathbf{T_c}$ **:** Kolektör sıcaklığı, °C
$\mathbf{T_{cp}}$ **:** Kolektöre giriş borusu sıcakığı, °C
$\mathbf{T_{hp}}$ **:** Kolektörden çıkış borusu sıcaklığı, °C
$\mathbf{T_{se}}$ **:** Depo çıkış sıcaklığı, °C
$\mathbf{h_{1,2,3}}$ **:** Entalpi değerleri, kj/kg
$\mathbf{C_A}$ **:** Kolektör uzunluğu başına birim maliyet, TL/m^2
$\mathbf{C_E}$ **:** Diğer sistemlerin maliyetleri, TL
$\mathbf{F_{PR}}$ **:** Düzgün serilerle sermayenin yeniden elde edilmesi faktörü,
i **:** Faiz,
Hu **:** Doğalgazın alt ısıl değeri, KW/m^3
$\mathbf{Q_{kondenser}}$ **:** Kondenserin ısı kapasitesi, kW
$\mathbf{Q_{evaporator}}$ **:** Evaporatör ısı kapasitesi, kW
$\mathbf{Q_{komp}}$ **:** Kompresör gücü, kW

BİNALARDA KOMBİNE ISITMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada İstanbul'da müstakil bir evin ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak üzere, güneş enerjili, ısı pompalı ve kazanlı bir kombine sistem modellenmiştir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan, saatlik dış hava sıcaklığı ve saatlik güneş ışınımı değerleri kullanılarak MATLAB programı ile hesaplamalar yapılmıştır.

İstanbul'daki bu müstakil ev için net ısıtma enerjisi ihtiyacı Energyplus programı kullanılarak, kullanma sıcak suyu ihtiyacı ise DHW- calc programı ile saatlik olarak belirlenmiştir. Sistemi modellerken öncelikli olarak güneş enerjisi kullanılması öngörülmüştür. Karşılanamayan ihtiyaçların ise ısı pompası ve/veya kazan ile karşılanması durumunda ortaya çıkacak sistem performansı incelenmiştir.

Sistemde, güneş kolektörü, depolama tankı, toprak ısı değiştiricisi, evaporatör, kompresör, kondenser gibi elemanlar bulunmaktadır. Kontrol sistemi için depolama tankı sıcaklığı baz alınarak depo sıcaklığı gereken değerin altına düştüğünde yardımcı sistemler devreye girecek şekilde modelleme yapılmıştır. Güneş enerjisinden, hem doğrudan mahal ve sıcak suyu ısıtma amaçlı olarak hem de ısı pompasına giriş suyunu ısıtma amaçlı olarak iki şekilde faydalanılmıştır. Böylece ısı pompası dual-source denilen çift kaynaklı biçimde kullanılarak enerji tüketimi azaltılmıştır. Isı pompası toprak kaynaklı seçilmiştir ve toprak ısı değiştiricisi tasarımı yapılmıştır. Mahaller radyatörle ısıtıldığından ısı pompasının ısı kuyusu su seçilmiştir. Isı yükü için gerekli olan kolektör alanı ve ısı pompası elemanları da incelenerek kompresörün gücü, buharlaştırıcının sistemden çekeceği ısı yükü, yoğuşturucudan ortama aktarılacak olan ısı yükü miktarları ve soğutucu akışkan debisi hesaplanarak sistemin boyutlandırılması yapılmıştır.

Ayrıca konutta güneş enerjisi, ısı pompası ve kazanın birlikte kombine olarak kullanılma durumu ile kazanın ve ısı pompasının tek başına kullanılması durumlarındaki yatırım ve işletme maliyetleri incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

MODELLING OF THE COMBINED HEATING SYSTEMS IN BUILDINGS

SUMMARY

In this study, a combined system which includes solar powered heat pump with boiler has been modelled to meet the heating and hot water demand of a single family house in Istanbul. Calculations have been made by MATLAB software using the hourly reports of outside temperature and solar radiation which are taken form Turkish State Meteorological Service.

For this single family house in Istanbul, hourly demand of net heating energy was calculated by using Energyplus software and hourly need of hot water was calculated by using DHW-calc software. While modelling the system, use of solar energy was set to have priority in use. System performance was analyzed in case of the needs which are not meet by solar energy are supposed to meet by heat pump and/or boiler.

System includes solar collector, storage tank, ground heat exchanger, evaporator, compressor, and condenser. The control system is based on the temperature of storage tank, so it has been modelled that when the temperature of the storage tank decreases, the auxiliary systems are set in . Solar energy is used for direct heating of space and hot water also used for heating of inlet water of heat pump. Thus heat pump is able to be used as dual-source heat pump therefore heat pump's energy consumption decreases. Heat pump has been selected as a ground source heat pump and ground heat exchanger was designed. Heat pumps heat sink was selected as water because spaces are heated by radiators. Power of the compressor, heat capacity of evaporator, condenser and the flow rate of the cooling water were calculated and dimensions of the system were determined by investigation of collector area for the heat capacity and heat pump parts.

Moreover, comparison of investment and operational costs between solar powered heat pump with boiler and stand-alone heat pump or stand-alone boiler have been investigated and done.

1. GİRİŞ

Yaşamımız için ihtiyaç duyduğumuz enerjinin değeri her geçen gün artmaktadır. Bir yandan fosil kaynakların hızla tükenmesi, diğer yandan da sera gazı salımlarının yol açtığı küresel ısınma ile birlikte yenilenebilir enerji kullanımı gelecekte bir nevi zorunlu hale gelecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artık çoğu gelişmiş ülkenin gündeminde üst sıralarda yer almaktadır. Ülkemizde de enerji politikaları bu düşünceye odaklı belirlenmelidir. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından iyi bir konumda bulunmaktadır; özellikle güneş ışınımından yararlanma oranı yüksek bir bölgededir.

Güneş enerjisi sürekli yenilenen ve masrafsız bir enerjidir. Isıtma başta olmak üzere kurutma, pişirme, ortam ısıtma, elektrik üretme gibi pek çok alanda güneş enerjisinden faydalanılmaktadır.

Binalarda güneş enerjisinden aktif ve pasif olarak faydalanılabilmektedir. Aktif uygulamalar güneş enerjisiyle ısı elde etmek ve elektrik elde etmek için kurulan mekanik sistemleri içerirler. Pasif uygulamalar ise genel olarak güneş enerjisinden verimli bir şekilde faydalanmaya yönelik mimari tasarımları kapsar.

Isı pompası ise sıcaklığı düşük olan bir kaynaktan aldığı ısıyı kullanarak daha yüksek sıcaklığa sahip ortama aktaran bir sistem olduğundan enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Özellikle güneş enerjisini absorbe eden ve tükenmeyen bir kaynak olan toprak kaynağını kullanan ısı pompalarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Kombine sistemler için, özellikle güneş enerjili sistemler üzerine yapılmış birçok simulasyon programı mevcuttur. TRNSYS, Polysun gibi programlar bu tip modellemede kullanılmaktadırlar.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı , binalarda kombine (birleşik) olarak kullanılabilen güneş enerjili sistem, ısı pompası ve kazanı modelleyerek yıl boyunca saatlik olarak simulasyonlarla davranışlarını incelemektir. Ayrıca çeşitli senaryolar ve çalışma modları üzerinden ekonomik analiz yaparak optimum sisteme karar vermek de amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Çalışması

Carnot buhar çevriminin ters çalıştırılması ile ortamdan ısı çekilerek başka bir yüksek sıcaklık ortamına bu ısının aktarılabileceğini gözlemlemiştirve ilk olarak 1824 yılında bu fikri ortaya atmıştır. Pratikte bu prensiple çalışan ısı pompası ise 1852 yılında William Thompson ve daha sonra Lord Kelvin tarafından denenmiştir. Daha sonraki yıllarda ısı pompaları hakkında pek çok çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Miles; "Heat Pumps: Theory and Service" adlı kitabında toprak kaynaklı ısı pompalarına geniş yer vermiştir. Bu kitapta toprak direnci ve boru direnci değerleri bir tablo halinde verilmiş olup toprak ısı değiştiricisinin boru boyunun hesaplanmasında metodoloji geliştirmiştir (Miles, 1994).

Kavanaugh çalışmalarında toprak kaynaklı ısı değiştiricileri ve toprak ısı direnci hakkında araştırmalar yapmıştır, ayrıca Remund ve Lund ile birlikte aynı konu hakkında makale yayımlamışlardır (Kavanaugh, 1997).

Ataman yüksek lisans tez çalışmasında, Göztepe'de inşa edilen bir konutun toprak kaynaklı ısı pompası ile ısıtılmasını ele almıştır. Konutun ısı kaybını, derece-gün metoduyla hesaplayarak uygun ısı pompası seçimi yapmıştır. Seçilen bu ısı pompasının çalışma şartlarına uygun olarak, toprak ısı değiştiricilerinin boyutlandırılmasını da yapmıştır (Ataman, 1991).

Özgener ve Hepbaşlı, çalışmalarında güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sistemini incelemişlerdir. Buhar sıkıştırmalı güneş destekli ısı pompası 1,4 kW'lık kompresör, 8,2 kW'lık evaporatör ve 1,5 m uzunluğunda kılcal borulardan oluşmuştur. Soğutucu akışkan olarak R–22 kullanılmıştır. Isı pompası için COP 2–3,125 arasında ve soğutma için COP ısı pompası değerlerinden %5–20 daha düşük bulunmuştur (Özgener and Hepbaşlı, 2007).

Yamaç, çalışmasında güneş enerjisi destekli bir ısı pompasını teorik olarak incelemiştir. Sistemde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanmıştır. Hesaplamalarında bir işletmenin ihtiyacı olan günlük 5 ton şebeke suyunun 14°C'den 50°C'ye çıkarılması için ısı pompası sisteminin ihtiyaç duyduğu ısı yükünün ne kadarının kolektörden karşılandığı ve ne kadarının karşılanamadığını incelemiş ve sistemin etkinlik katsayısını (COP) 4,39 olarak bulmuştur. Ayrıca ısı yükü için gerekli olan kolektör alanını ve ısı pompası elemanlarını da inceleyerek kompresörün gücünü 7,7 kW, buharlaştırıcının kolektör sisteminden çekeceği ısı yükünü 28,31 kW ve soğutucu akışkan debisini 0.23 kg/s olarak hesaplamıştır (Yamaç, 2005).

Badescu termal enerji üniteli alan ısıtması yapan bir güneş enerjisi destekli ısı pompası modeli üzerine yaptığı çalışmada güneş enerjisi destekli ısıtıcıların ısı pompalarındaki buhar sıkıştırma işi ve başka amaçlara yönelik ısıl enerji elde ettiğini ve ısıl enerji ünitesinin güneş enerjisi kullanımında birçok yarar sağladığını ortaya koymuştur (Badescu, 2001).

Yamankaradeniz, doktora çalışmasında güneş enerjisi kaynaklı ısı pompasını teorik ve deneysel incelemiştir.Teorik çalışmada, İstanbul şartlarında açık günler için anlık, aylık ve mevsimlik ortalama ısıtma tesir katsayıları ve sistemin diğer özellikleri incelenmiştir.Ayrıca aynı hesaplamaları Adana ve İzmir için de yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Deneyler ise İstanbul şartlarında açık günler için Şubat, Mart ve Nisan aylarında yapılmıştır.Teorik sonuçlar ile karşılaştırıldığında %3 ile %10 arasında fark olduğu görülmüştür. Bu durum deney ve teorik analiz arasında iyi bir uyum sağlandığını göstermiştir.(Yamankaradeniz,1982)

Kaygusuz, Karadeniz Bölgesi'ndeki konutların güneş enerjisi destekli ısı pompaları ile ısıtılabilirliğini incelemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışmada model bir ortam seçilerek enerji depolu bir ısı pompası sistemi kurulmuş ve bu sistem üç degişik biçimde çalıştırılarak ortamın ısıtılabilirliği gözlemlenmiştir. Deneyde kolektör giriş-çıkışı, depo giriş-çıkışı, ısı değiştirici giriş-çıkışı, depo içi, dış ortam, ısıtılan ortam, yoğunlaştırıcı giriş-çıkış sıcaklıkları periyodik olarak kontrol edilmiştir. (Kaygusuz, 2000).

Ünsal ve Söylemez çalışmalarında güneş enerjisi destekli çift depolu su ısıtma sistemlerinin uzun dönemli depolama kabiliyetlerini incelemişlerdir. Bu incelemede dört farklı çalışma ve yerleşim tipi kullanmışlardır ve seri tank sistemi ile seri sıvı akışlı olanın en iyi yıllık sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir (Ünsal ve Söylemez, 1989)

Öztürk, çalışmasında, güneş enerjisinin mahal ısıtması ve sıcak su temini için ortak kullanılmasıyla ilgili hesaplamalar yapmıştır. Eskişehir ilinde seçilen örnek bir binanın ortalama çevre sıcaklıklarına göre binanın toplam ısı ihtiyacını hesaplamıştır. Birkaç ekonomik analiz sonucunda optimum kolektör alanını 40–50 m^2 arasında bulmuştur. Evaporatörün depo içinde olduğu durumda -12°C çevre sıcaklığı için kompresör gücünü 1.91 kW, depo dışında ve toprağa gömülü durumda ise 2,1 kW bulmuştur (Öztürk, 1985).

2. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ

Güneş enerjisi tükenmeyen, bol, temiz ve bedava bir enerji kaynağı olduğundan optimum kullanılmasına yönelik çalışmalar sürmektedir. Toplam enerji rezervi $1{,}785x10^{47}$ joule olan bu yıldız daha milyonlarca yıl ışımasını sürdüreceğinden dünya için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Bu enerjinin güç olarak karşılığı $3{,}86xl0^{20}$ MW'tır. Dünyanın tüm yüzeyine bir yıl boyunca gelen güneş enerjisi 0,709 x 10^{14} TEP kadardır. Bu değer dünyanın bilinen petrol rezervinin 716 ve kömür rezervinin 157 katıdır.

Güneşin enerjisi, güneş çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Füzyon, dört hidrojen çekirdeği birleşerek, bir helyum çekirdeğini oluşturması şeklindedir. Bu füzyon reaktöründe her saniyede 564 milyon ton hidrojen 560 milyon ton helyuma dönüşür. Bu dönüşümde kaybolan 4 milyon ton kütlenin karşılığı olarak $3{,}86x10^{26}$ joule enerji açığa çıkar. Isıma gücünün önemli bir bölümü okyanusların buharlaşması, su ve rüzgar dolaşımı, bitkisel ve hayvansal madde üretimi gibi doğal çevrimleri beslemede tüketilmesi yüzünden güneş enerjisinin tümünü toplamak olanaksızdır. Doğrudan kullanılabilecek diğer bölümünü, yeryüzüne gelen ve gücü yatay yüzeyde enleme göre 0-1100 W/m2 arasında değişen ışık ışınları oluşturur (Gündüz,2007).

Güneş enerjisi, elektromanyetik (radyasyon) olarak yayılır. Dalga boyu 0,2–3 μm arasında olan bu ışın kısa dalga boyudur. Güneş spektrumu 3 ana bölgeden oluşur. Dalga boyu 0,4 μm den küçük olan ultraviyole (mor ötesi) ışınlar ışınımın %9'unu oluşturur. 0,4–0,7 μm arası dalga boyuna sahip ışınımlar görünür ışık olup ışınımın %45' ini oluşturur. Dalga boyu 0,7 μm'den büyük ışınımlar infrared (kızılötesi) ise ışınımın % 46' sını oluşturur ve ısıtma etkisine sahiptir.

2.1 Güneş enerjisinin karakteristikleri

Güneş enerjisi bilinen en eski enerji kaynağıdır. Temiz ve tükenmeyen (yenilenebilir) enerji kaynağıdır, tüm dünya ülkelerinde rahatlıkla yararlanabilir, coğrafi sınırlamalardan bağımsızdır, ısıtmada basit teknolojilerden yararlanıldığından ulaştırma harcamasına gerek yoktur.

Güneş enerjisinin sıralanan avantajlarına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. Birim alana gelen enerjinin az olması ve süreklilik göstermemesi, arz talep arasında zaman farkı sorununun ortaya çıkması, enerji miktarının kontrol edilmesi, direkt elektrik sistemleri için yatırım maliyetlerinin yüksek olması dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajlarına rağmen güneş enerjisinde son yıllarda geniş bir yelpazeye sahip teknolojik uygulamalarda rahatlıkla faydalanılmaktadır.

2.1.1 Türkiye'de güneş enerjisi

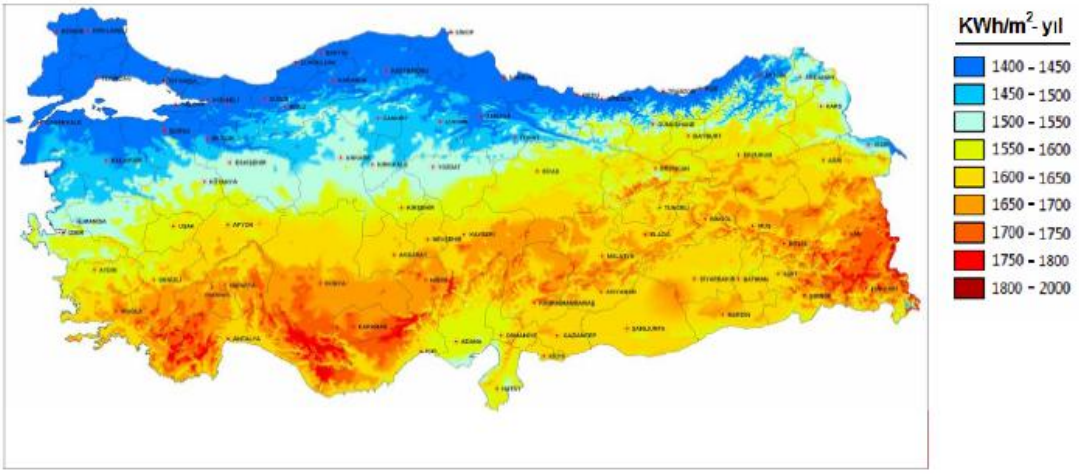
Coğrafi olarak 36 – 42° kuzey enlemleri arasında bulunan ülkemiz, güneş kuşağı bölgesinde yer almaktadır. Güneş kuşağının bu bölümü iyi güneş almakla birlikte mevsim değişikliklerinin alt sınırda az, üst sınırda çok etkili olduğu bir bölgedir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nde (DMİGM) mevcut bulunan ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım siddetinin 1311 kWh/m^2yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m^2) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süreleri Çizelge 2.1' de verilmiştir (Anonim 1).

Çizelge 2.1 : Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri

Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli
Kaynak: EİE Genel Müdürlüğü

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (Kcal/cm^2-ay)	(kWh/m^2-ay)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
OCAK	4,45	51,75	103,0
ŞUBAT	5,44	63,27	115,0
MART	8,31	96,65	165,0
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	14,51	168,75	325,0
TEMMUZ	15,08	175,38	365,0
AĞUSTOS	13,62	158,40	343,0
EYLÜL	10,60	123,28	280,0
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	4,03	46,87	103,0
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm^2-gün	3,6 kWh/m^2-gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güneydoğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve birim alana düşen yıllık güneş ışınımı değerlerinin dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir (EİE).



Şekil 2.1 : Birim alana düşen yıllık güneş ışınımı değerleri(EİE)

Türkiye'nin güneşlenme süresi ve güneş ışınımı siddeti değerleri temel alındığında, tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi $3517xl0^{12}$ kJ olarak hesaplanmıştır. Yani Türkiye'nin bir yılda aldığı güneş enerjisi 80 milyar TEP (ton eşdeğer petrol) tir. Bu enerji 1115xl08 kJ' a karşılık gelmektedir. Türkiye'ye düşen toplam güneş gücü kurulu elektrik santralleri gücünün 5300 katından fazladır. Bu açıdan güneş enerjisinden faydalanan sistemlerin geliştirilmesine önem vermek gerekmektedir (Yamaç, 2005).

2.2 Güneş Açıları

Dünya kendi etrafında ve güneş etrafında olmak üzere iki farklı yörüngede hareket yapmaktadır. Bundan dolayı; güneş enerjisinden yeterli miktarda yararlanmak için bir zaman diliminde bir yere gelen güneş ışınımının bilinmesi gerekmektedir. Yeryüzündeki bir düzlemin konumu güneş açıları ile belirlenmektedir.

2.2.1 Esas güneş açıları

Yeryüzünde bir noktaya gelen direkt güneş ışınımı doğrultusu o noktanın enlemi(e), saat açısı(s) ve deklinasyon açısı(d) biliniyorsa bulunabilir. Bu açılara esas güneş açısı denir (Kılıç ve Öztürk, 1983).

2.2.1.1 Deklinasyon Açısı (d)

Yerin güneş etrafındaki yörünge düzleminin normali ile yerin kendi yörünge ekseni arasında 23,45 derecelik açı vardır. Bu açı, yeryüzündeki aynı noktaya gelen güneş ışınlarının doğrultusunun değişmesine ve mevsimlerin olusmasına neden olmaktadır. Enlemi e olan yeryüzündeki bir noktaya düşen güneş ışınımının doğrultusu deklinasyon açısı ve saat açısı ile tespit edilmektedir. Dünya-güneş doğrultusunun yerin ekvator düzlemi ile yaptığı açıya deklinasyon açısı denilmektedir ve ekvator düzleminin kuzey tarafı pozitif alınmaktadır.

Yılın günleri n = 1,2,3,...,365 olmak üzere Cooper (1969) deklinasyon açısını (d)

$$d = 23{,}45.\sin\left(360.\frac{284+n}{365}\right) \qquad \textbf{(2.1)}$$

olarak ifade etmiştir (Goswami et al., 1999).

2.2.1.2 Saat Açısı(h)

Hesaplama yapılacak yerin boylamı ile güneşin bulunduğu boylam arasındaki açıdır. Saat açısı güneş öğlesine göre hesaplanır. Güneş öğlesinden önce saat açısı pozitif, güneş öğlesinden sonra negatiftir. İki boylam arası 1 saat veya 15° olduğundan saat açısı;

$$h = 15.(12 - GS) \quad \textbf{(2.2)}$$

bağıntısı ile hesaplanır (Kılıç ve Öztürk, 1983).

Bu eşitlikteki h saat açısı, GS ise güneş saatini ifade eder.

2.2.1.3 Enlem Açısı (e)

Ekvator düzlemi ile göz önünde bulundurulan nokta arasındaki açıdır. Kuzey yarımkürede (+) ve güney yarımkürede (-) olarak kabul edilir (Ballı, 2002).

2.2.2 Türetilen güneş açıları

Yatay ve eğik düzleme gelen güneş ışınımının hesaplanmasında, düzlem ve güneş ışınlarının doğrultusu ile ilgili açılardan yararlanılır.

2.2.2.1 Güneş Zenit Açısı (z)

Yatay düzlemin normali ile güneş-dünya doğrultusundaki güneş ışınlarının yaptığı açıdır. Deklinasyon açısı d, saat açısı h, enlem e ve zenit açısı z olmak üzere zenit açısının kosinüsü;

$$\cos z = \cos e.\cos d.\cos h + \sin e.\sin d \quad \textbf{(2.3)}$$

şeklinde hesaplanır (Kılıç ve Öztürk, 1983).

2.2.2.2 Güneş Yükseklik Açısı (y)

Güneş-dünya doğrultusundaki güneş ışınlarının yatay düzlem ile yaptığı açıdır. Güneş yüksekliği açısı y olmak üzere; z + y = 90° veya cos z = sin y şeklindedir. Güneş yükseklik açısı; deklinasyon açısının, enlemin ve saat açısının fonksiyonu olarak;

$$\sin y = \cos e.\cos d.\cos h + \sin e.\sin d \quad \textbf{(2.4)}$$

şeklinde hesaplanır.

2.2.2.3 Gün Uzunluğu (t_g)

Güneş doğuşu ile batışı arasında geçen zamana gün uzunluğu denir. Güneş doğuşunda ve batışında güneş zenit açısı z = 90°, güneş öğlesinde güneş zenit açısı z = 0° 'dir. Eşitlik (2.3)'te z = 90° yazılarak güneş doğuşu ve batışındaki saat açısının (H) kosinüs'ü

$$\cos H = \frac{-\text{sine.sind}}{\text{cose.cosd}} = -\text{tand.tane} \qquad \textbf{(2.5)}$$

şeklinde verilir. Derece cinsinden gün uzunluğu (H);

$$\cos H = -\text{tane} \,.\, \text{tand} \qquad \textbf{(2.6)}$$

Saat cinsinden gün uzunluğu;

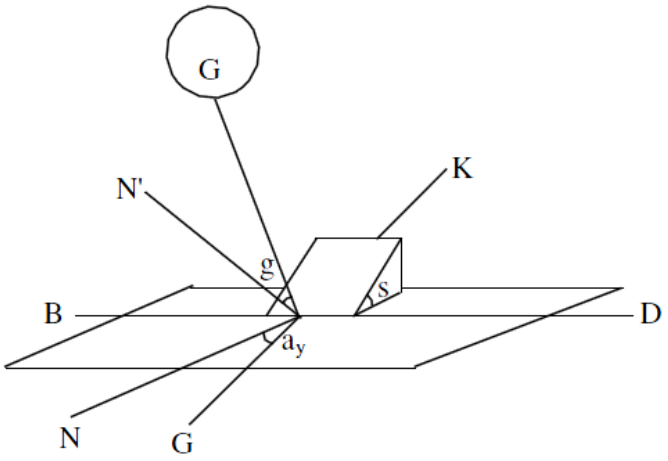
$$t_g = 2.\frac{H}{15} = \frac{2}{15}.\arccos(-\text{tand.tane}) \qquad \textbf{(2.7)}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

2.2.3 Eğik yüzeyin açıları

Eğik bir düzlemin konumu yatay düzlemle yaptığı eğim açısı ve azimut açısı ile belirlenir (Kılıç ve Öztürk, 1983).

Şekil 2.2'de eğik düzleme gelen güneş açıları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Eğik düzleme gelen güneş açıları

2.2.3.1 Eğim Açısı (s)

Eğik düzlemin yatay düzlemle yaptığı açıdır (Yamaç, 2005).

2.2.3.2 Güneş Azimut Açısı (a_g)

Güneş-dünya doğrultusundaki güneş ışınlarının kuzey-güney doğrultusu ile yaptığı açıdır. Güneş azimut açısı ag olmak üzere; azimut açısının sinüs'ünü;

$$\sin a_g = \sec y.\cos d.\sin h \quad \textbf{(2.8)}$$

bağıntısı ile ifade edilir (Kılıç, A. ve Öztürk, A., 1983) Hesaplama yapılan güneş saati; güneş öğlesinden önce ise $a_g = a_g$ güneş öğlesinden sonra ise $a_g = 360 - a_g$'dir (Ballı, 2002).

2.2.3.3 Güneş Geliş Açısı (g)

Güneş düzleminin eğik düzlemin normali ile yaptığı açıdır. Eğik düzlemin yatay düzlem ile yaptığı açıya eğim açısı(s), eğik düzlemin normalinin yatay düzlemdeki izdüşümünün güneyden kuzeye doğru yaptığı açıya eğik düzlem azimut açısı(a_g) denir ve

$$\cos g = \text{sind .sine. coss - sind. cose. sins.cos}a_g + \text{cosd .cose .coss .cosh...} \\ + \text{cosd. sine .sins. cosh.cos } a_g + \text{cosd.sins.sin } a_g\text{.sinh} \quad \textbf{(2.9)}$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Ekvatora (güneye) doğru eğik düzlem için düzlem azimut açısı ay =0° olduğundan dolayı, güneye eğik düzlem için güneş geliş açısının (g_g) kosinüs'ü;

$$\cos g_g = \text{sind .sine. coss - sind. cose. sins + cosd .cose .coss .cosh +cosd. sine .sins. cosh} \quad \textbf{(2.10)}$$

bağıntısı ile ifade edilir (Kılıç ve Öztürk, 1983).

2.3 Güneş Saati (GS)

Yılın günlerine (n = 1,2,3,....,365) bağlı değişken olmak üzere, dünyanın dönme hızındaki ve yörüngesindeki düzensizlikten ileri gelen ve günden güne değişen zaman düzeltmesi (ZD);

$$ZD = 229,2.(0,000075 + 0,001868.\cos B - 0,032077.\sin B - 0,014615.\cos 2B - 0,04089.\sin 2B)$$

$$B = 360.\frac{n - 1}{365} \qquad \textbf{(2.11)}$$

bağıntıları ile ifade edilir.

Hesaplama yapılacak ülkenin standart ülke boylamı B_{st}, hesaplama yapılacak yerin boylamı B_y (Doğu-batı yönü pozitif) ve Türkiye saati TS olmak üzere güneş saati;

$$GS = TS - \frac{(B_{st} - B_y)}{15} + \frac{ZD}{60} \qquad \textbf{(2.12)}$$

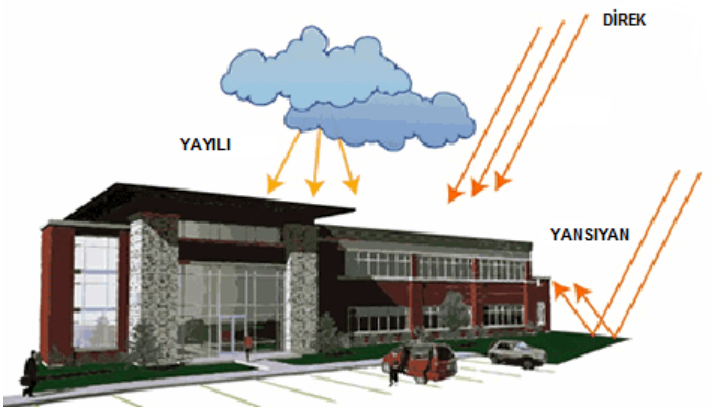
B_{st}: Türkiye için standart boylam 45°'dir. (Kılıç ve Öztürk,1983)

ZD : Zaman düzeltmesi

n: yıldaki gün sayısı (hesaplanan güne tekabül eden sayı)

2.4 Yeryüzüne Gelen Güneş Işınımı

Güneşten gelen ışınımlar yeryüzüne geldiğinde atmosferden geçerken kayıplara uğrar. Yeryüzüne ulasabilen ışınımlar ise % 10–80 arasında değişir. Güneş ışınımlarının direkt yeryüzüne gelen kısmına direkt güneş ışınımı, dağılan kısmına yayılı (difüz) güneş ışınımı adı verilir. Her iki ışınımın toplamına da tüm güneş ışınımı adı verilir. Tüm güneş ışınımları 0,3–3,0 μm dalga boyu aralığında olup bunlara kısa dalga boylu ışınım adı verilir. Tüm ışınımına yansıyan ışınlar dâhil edildiğinde toplam güneş ışınımı tanımı yapılır (Kılıç ve Öztürk, 1983). Şekil 2.3'te yeryüzüne gelen toplam güneş ışınımı bileşenleri gösterilmiştir (Kıncay, 2004).



Şekil 2.3 : Yeryüzüne gelen güneş ışınımı bileşenleri

2.4.1 Atmosfer dışına gelen güneş ışınımı

Güneş ışınımı hesaplamaları yapılırken atmosfer dışına gelen ışınımlarında bilinmesi önemli bir fayda sağlar. Dünya-Güneş arasındaki uzaklık sabit olmadığından atmosfer dışına gelen ışınımların değeri değişkendir. Dünya güneş mesafesinde; atmosfer dışında güneş ışınlarının dik birim alana bütün dalga boylarında bir anda gelen güneş ışınımı değerine güneş sabiti adı verilir ve I_{gs} ile gösterilir (Yamaç, 2005).

Yapılan çalışmalarda güneş sabiti değerleri 1353–1370 W/m^2 arasında bulunmuştur. Helwa, N. (2000) çalışmasında 357 W/m^2 , Kılıç, A. (1983) kitabında 1353 W/m^2, Iqbal, M. (1983) kitabında 1367 W/m^2 değerini kullanmıştır (Ballı, 2002). Joule cinsinden ifade etmek istenirse 4870,8 kJ/m^{2}h değeri kullanılabilir.

Atmosfer dışında yatay birim düzleme bir anda gelen güneş ışınımı (2.13)eşitliğiyle hesaplanır.

$$G_o = I_{gs}.f.\sin(y) \qquad \textbf{(2.13)}$$

Burada açısı G_o atmosfer dışına gelen aylık ortalama saatlik güneş ışınımını, y güneş yükseklik açısını ve f ise güneş sabiti düzeltme faktörünü ifade eder. Güneş sabiti düzeltme faktörü f (2.14)eşitliğiyle hesaplanır (Goswami et al, 1999).

$$f = 1+0.033.\left(360\frac{n}{365}\right) \qquad \textbf{(2.14)}$$

I_{gs}=1353 W/m^2 veya I_{gs}=4870,8 kJ/m^{2}h olarak alınır.

Atmosfer dışına gelen günlük ve saatlik ışınım hesaplanırken genelde aylık ortalama değerlerine ihtiyaç duyulur. (2.15) eşitliğindeki Q_o atmosfer dışına gelen aylık ortalama günlük ışınımını ifade eder ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Q_o = \frac{24.3600}{\pi} I_{gs}.\left[1+0.033.\left(360\frac{n}{365}\right)\right].\left[\cos e.\cos d.(\sin H)+\frac{\pi.H}{180}\sin e.\sin d\right] \qquad \textbf{(2.15)}$$

I_o ise atmosfer dışına gelen aylık ortalama saatlik ışınımı ifade eder ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$I_o = \frac{12}{\pi} I_{gs}.\left[1 + 0.033.\left(360.\frac{n}{365}\right)\right].\left[\cos e.\cos d.(\sin h_2 - \sin h_1) + \frac{\pi.(h_2-h_1)}{180}\sin e.\sin d\right] \qquad \textbf{(2.16)}$$

2.4.2 Yatay Düzleme Gelen Aylık Ortalama Günlük Tüm Güneş Işınımı

Tüm güneş ışınımı ve güneşlenme süreleri ölçümleri geniş olarak Devlet Meteoroji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİGM) tarafından yapılmaktadır. Yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük tüm güneş ışınımının oranının izafi güneşlenme süresi ile lineer değişimi ilk defa Anström tarafından araştırılmıştır. Açık gökyüzünde yeryüzündeki yatay düzlemin birim alanına gelen günlük tüm güneş ışınımı (Q); güneşlenme süresi (t) ve gün uzunluğuna (t_o) bağlı olarak değiştirilmiş Angström denklemi ile

$$\frac{Q}{Q_o} = a + b.\frac{t}{t_o} \qquad \textbf{(2.17)}$$

ifade edilir. Bu denklemdeki a ve b katsayıları tüm güneş ışınımı ve güneşlenme süresi verilerine dayanarak istatistik metodlarla tayin edilmektedir. Türkiye için- a = 0,19–0,47 ve b = 0.14 -0.42 arasında değerler almaktadır (Kılıç ve Öztürk, 1983).

2.4.3 Yatay Düzleme Gelen Aylık Ortalama Günlük Direkt ve Yayılı Güneş Işınımı

Yatay düzleme gelen doğrudan(beam) güneş ışınımının hesaplanması için öncelikle yatay düzleme gelen toplam güneş ışınımının bilinmesi veya hesaplanması gerekir. Yayılı ışınım oranı ampirik bağlantılarda genellikle berraklık indeksi (Kt) veya güneşlenme süresinin gün uzunluğuna oranı olarak verilir. Diğer bir tanımlama yeryüzündeki yatay bir düzleme gelen güneş ışınımının atmosfer dışındaki yatay düzleme gelen güneş ışınımına oranıdır (Beckman ,1997). Berraklık indeksi

$$K_t = \frac{Q}{Q_o} \qquad \textbf{(2.18)}$$

eşitliğiyle ifade edilir.

Yayılı ışınım oranı r_y'nin berraklı indeksi ile değişimi konusunda birçok çalışma yapılmıştır.Page'in 1963 yılında bulduğu bağıntı basitliği sebebiyle en çok kullanılan bağıntıdır.Bu bağıntı aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$r_y = 1\text{-}1{,}13.K_t \qquad \textbf{(2.19)}$$

Yayılı ışınım oranı r_y de bulunduktan sonra günlük yayılı tüm güneş ışınımı Q_y rahatlıkla bulunabilir.

$$Q_y = Q.r_y \quad \textbf{(2.20)}$$

Direkt güneş ışınımı ise toplam güneş ışınımından yayılı güneş ışınımı çıkarılarak bulunur.

$$Q_d = Q - Q_y \quad \textbf{(2.21)}$$

2.4.4 Günlük değerlerden saatlik değerler elde etmek

Elde edilen değerler günlük olduğunda kesin değerler elde edilemeyebilir.Mesela açık gökyüzü, bulutlu ve parçalı bulutlu gökyüzü durumları için günlük toplamlar değerlerden sonuç elde etmek çoğu zaman doğru olmayabilir. Burada kullanılan bağıntılar güneş enerjisi işlemlerinin çoğu için en çok veri üreten açık gökyüzüne iyi sonuç veren bağıntılardır (Duffie and Beckman vd.,1997).

Saatlik ışınımının ortalamaları ve deneysel çalışmalarla birçok bağıntı ortaya konmuştur. Collares-Pereira ve Rabl 1979'da aşağıdaki eşitlikle çalışmalarını açıklamışlardır.

$$r_t = \frac{\pi}{24}.[a+b.\cosh].\frac{\cosh-\cos H}{\sin H-(\pi H/180).\cos H} \quad \textbf{(2.22)}$$

Bu eşitlikteki a ve b katsayıları ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a=0.409+0.5016.\sin(H-60)$$
$$b=0.6609-0.4767\sin(H-60) \quad \textbf{(2.23)}$$

Aylık toplam güneş ışınımı Q ve saatlik toplam güneş ışınımı I oranını veren eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$r_t = \frac{I}{Q} \quad \textbf{(2.24)}$$

Böylece saatlik toplam ışınım elde edilmiş olur. Yayılı ve direkt güneş ışınımını bulmak için ise aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

Saatlik yayılı güneş ışınımı:

$$I_y = Q_y.R_y \quad \textbf{(2.25)}$$

$$R_y = \frac{\pi}{24}.\frac{\text{cose.cosd.cosh+sine.sind}}{\text{cose.cosd.sinH+}\frac{\pi}{180}.\text{H.sine.sind}} \quad \textbf{(2.26)}$$

şeklinde ifade edilir.Direkt saatlik güneş ışınımı ise

$$I_d = I - I_y \quad \textbf{(2.27)}$$

eşitliğiyle hesaplanır.

2.4.5 Yeryüzünde eğik düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınımı

Güneş enerjisi uygulamalarında eğik düzleme gelen güneş ışınlarının bilinmesi gerekir. Eğik düzleme gelen ışınımlar düzlemin eğim açısına, yatay düzleme gelen tüm güneş ışınımının direkt ve yayılı ışınım miktarın, azimut açısına ve çevrenin yansıtma oranına bağlı olarak değişir.

2.4.5.1 Yeryüzünde eğik düzleme gelen anlık ortalama güneş ışınımı

Güneş ışınımına dik birim düzleme bir anda gelen direkt güneş ışınımı (I_n), güneş ışınımının eğik düzleme geliş açısı (g_g) ve zenit açısı miktarı (z) olmak üzere, eğik ve yatay düzlemlere gelen güneş ışınımı oranları

$$R_d = \frac{\cos g}{\cos z} \quad \textbf{(2.28)}$$

olarak yazılır. Güney-kuzey doğrultusuna dönük ($a_g = 0$) eğik düzlemler için

$$R_d = \frac{\cos g}{\cos z} = \frac{\cos(e-s).\cos d.\text{cosh} + \sin(e-d).\sin d}{\cos e.\cos d.\text{cosh} + \sin e.\sin d} \quad \textbf{(2.29)}$$

eşitliği ile ifade edilir.

2.4.5.2 Eğik düzleme gelen anlık toplam güneş ışınımı

Eğik düzleme gelen toplam güneş ışınımı direkt(I_d) ve yayılı (I_y) güneş ışınımlarıyla yansıyarak (I_{ya}) gelen ışınımların toplamıdır ve açık gökyüzü için aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$I_e = I_d.R_d + (I - I_d).\left(\frac{1 + \text{coss}}{2}\right) + I.\rho.\left(\frac{1 - \text{coss}}{2}\right)$$

$$I_y = I - I_d \quad \textbf{(2.30)}$$

Çevrenin yansıtma oranı ρ bitki örtüsüne topografik yapıya ve kar durumuna göre değişir ve ortalama 0,2 mertebesindedir.

2.5 Güneş Kolektörleri

Güneş kolektörleri sıcaklığı toplamak, depolamak ve güneş ısıl enerjisini taşımak için kullanılan aygıtlardır. Esasen güneş kolektörleri, akışkan-sıvı veya hava çalışmalarında gelen güneş ışınımlarını duyulur ısıya çeviren ısı değiştiricileridir (Capehart, et al., 2002).

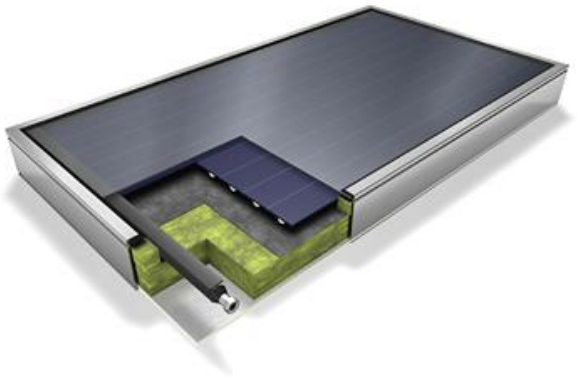
Güneş kolektörlerinin düz ve parabolik(odaklı) kolektörler olmak üzere iki çeşitleri bulunmaktadır. Kolektörlü sıcak su sistemleri genel olarak düzlemsel kolektörlerden meydana gelmektedir. Düz güneş kolektörlü sıcak su sistemleri 100°C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda hacim ısıtma su ısıtma, su havuzu ısıtma vb. amacıyla kullanılırlar.

Odaklı kolektörler ise güneş fırınları, merkezi alıcılı güç sistemleri vb.gibi daha yüksek sıcaklık gerektiren durumlarda kullanılır. Ayrıca odaklı kolektörlerde takip sistemi (tracking) de gerekmektedir (Kılıç ve Öztürk, 1983).

Güneş kolektörlü sistemler tabii dolaşımlı veya pompalı olarak dizayn edilirler. Tabii dolaşımlı sistemlerde sıcaklıkla orantılı olarak suyun yoğunluğunun artması veya azalması özelliğinden faydalanılır. Pompalı sistemlerde ise kolektör sistemindeki suyun sistemde dolaşabilmesi için bir pompaya ihtiyaç vardır. Büyük sistemlerde kullanımları uygundur.

2.5.1 Düzlemsel güneş kolektörlerinin elemanları

Düzlemsel kolektörler genellikle cam veya plastik saydam örtü ve akışkanlara ısı transfer eden absorber plakaya sahip dar metal veya ağaçtan kasalardan oluşur. Güneşin kısa dalga ışınımları saydam örtüden geçerek kolektöre girer ve akışkanı (genellikle antifrizli veya antifrizsiz su veya hava) ısıtır. Isınan akışkan kolektörden kullanma noktasına veya daha sonra kullanılmak üzere depoya hareket eder. Düzlemsel güneş kolektörleri Çoğunlukla güneye dönük (kuzey yarımkürede) ve açı verilerek yerleştirilir (Capehart, et al., 2002). Tipik bir düzlemsel kolektör Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Kaygusuz, 2000).



Şekil 2.4 : Tipik bir düz kolektör

2.5.1.1 Saydam örtü

Saydam örtüler güneş ışınımının bir kısmını geçirirler ve üsten olan ısı kayıplarını önlerler. Uygulamada düzlemsel güneş kolektörlerinde saydam örtü cam veya plastik esaslı malzemeler kullanılabilir. Çoğunlukla temperlenmiş cam kullanılmaktadır. Böylece sera etkisi ve kolektör verimi artar, aynı zamanda maliyet de artmaktadır.

Camlar yüksek sıcaklığa, aşınmaya ve çizilmeye dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklardan etkilenmez. Bu avantajların yanı sıra kırılgan olması, işlenebilme zorluğu, hassas boyutların sağlanamaması, ağır olması, sızdırmayı önlemek için plastik contalara ihtiyacı olması gibi dezavantajları vardır.

Camların dışındaki plastik esaslı örtülerin güneş ışınımı geçirme oranlarıda yüksek olduğundan seçici yüzeyli olmayan kolektörlerde iç örtü olarak kullanılabilir. Ancak plastikler orta ve yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybederler. Isıl genleşme katsayıları yüksek olduğundan bükülme ve sızdırma sorunları ortaya çıkmaktadır.

2.5.1.2 Yutucu yüzey (Absorber plaka)

Yutucu yüzey kolektörlerin en önemli kısmını oluşturur. Bu yüzey güneş ışınımını absorbe ederek ısıyı sistemdeki akışkana aktarır. Bu yüzden yutucu yüzeyin güneş ışınımı yutma oranının büyük ve uzun dalga boylu ışınımı yayıcılığı düşük olmalıdır. Yutucu yüzeylerde ısıyı akışkana çok iyi iletmek, ısı geçişinin hızlı olması ve ısı iletim katsayısının yüksek olması istendiginden malzeme olarak metal levhalar kullanılır. Metal levha olarak genellikle bakır (Cu), alüminyum, çelik ve paslanmaz çelik kullanılır. Bunların dışında akrilik, polipropilen ve plastiklerde siyaha boyanarak yutucu yüzey olarak kullanılabilir. Yutucu yüzeylerde ısı geçişi borular arasındaki mesafeye ve malzemenin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Çizelge 2.2'de bazı yutucu yüzey malzemelerinin ısı iletim katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Bazı yutucu yüzey malzemelerinin ısı iletim katsayıları

Malzeme	Isı iletim katsayısı kW/m^2K	Malzeme	Isı iletim katsayısı kW/m^2K
Bakır	386	Akrilik	0,20
Alüminyum	204	Polietilen	0,35
Çelik	50	Polipropilen	0,20
Paslanmaz çelik	24	PVC	0,16

Pratikte borular ve emici plakalar bakır (Cu) ve alüminyum (Al) gibi iletkenliği yüksek malzemelerden seçilir.Yutucu yüzeylerin ömürleri korozyona bağlı olarak değişir. Saydam örtü yüzeyinde yoğunlaşan suyun levhaya akması veya yağmur sularının içeri sızması yüzeyin dış korozyona uğramasına sebep olur. Çelik levhalar bu tür dış korozyonlara karşı dayanıklı değildir. Ayrıca sistemdeki akışkanın içinde bulunan çözülmüş oksijen çelik levhaların aşınmasına neden olur (Kılıç ve Öztürk, 1983).

2.5.1.3 Yutucu yüzeylerin kaplanması

Yutucu yüzeylerde ışınım geçirilmeden, belli bir dalga boyunda, yansıtma ve yutma oranlarının toplamı birdir. Uygulamalarda kolektörlerde kullanılan yutucu yüzey malzemelerinin yutma oranı düşüktür. Bu nedenle yutucu yüzeylerin üst kısımları yutma oranları yüksek malzemelerle kaplanır. Kaplama iki yöntemle yapılır: Seçici (Selektif) kaplama ve siyah boya ile kaplama.

Seçici yüzey kaplamada ideal bir siyah yüzey her açıdan gelen farklı dalga boylarındaki ışınımın tamamını yutar ve yayıcılığının yüksek olması istenir. Fakat ideal olmayan (gerçek) yüzeyler geliş açılarına bağlı olarak ışınımın bir kısmını geri yansıtır ve ısıl ışınımının tamamını yutar ve uzun dalga boyu ışınımı yayıcılığı düşük olan yüzey olarak tanımlanır. Seçici yüzeyler yutucu yüzeylere ince bir film halinde kaplanır. Seçici yüzeyler pahalı ve kısa ömürlüdür. Bakır veya çelik üzerine yapılan kaplamalar sıcaklığa ve neme dayanıklı olduğu için ideal seçici yüzey olarak bilinir.

Siyah kaplamalar ise konutlar için su ısıtma, hava ısıtma gibi düşük sıcaklıklarda çalışan sistemler için daha uygundur. Siyah boyalı yüzeylerin yutma ve yansıtma oranları yüksektir. Siyah boya olarak mat siyah boyalar kullanılır. Mat bir siyah boyanın yutma oranı 0,90–0,98 ve yansıtma oranı 0,85–0,92 arasındadır (Yamaç, 2005).

2.5.1.4 Yutma-geçirme çarpımı

Saydam örtüyü geçerek yutucu yüzey üzerine gelen güneş ışınımının büyük bir kısmı yüzey tarafından yutulurken bir kısmı yansıtılır. Yansıtılan ışınım saydam örtünün alt kısmına gelir ve bir kısmı geçerken bir kısmı yeniden yansıtır ve böylece devam eder. Toplam yutma-geçirme çarpımı güneş ışınımının geliş açısı ile birlikte bulunan yerin enlemine, zamanına ve kolektörün eğimine bağlıdır.

2.5.1.5 Kolektör kasası

Güneş kolektörlerinin kasaları çoğunlukla alüminyum olup ayrıca, plastik, paslanmaz çelik, galvanizli çelik saç, polipropilen ve ahsap kasalarda kullanılabilmektedir. Kullanılan malzemeye göre gövde tasarımı değişiklik gösterir. Birçok kolektör ekstrüze alüminyum profilden yapılmıştır. Ekstrüze alüminyum profil hafiftir, modül boyutlarında mümkün olan en yüksek esneklige sahiptir. Daha karmaşık şekiller profile entegre edilebilir. Maliyetleri de oldukça düşüktür. Galvanize veya paslanmaz çelik uygulamalı gövdelerin kullanımıyla ağırlığı oldukça yüksek kasalar elde edilmektedir. Kasa yalıtkanın ıslanmasını önleyebilecek sızdırmazlıkta olmalıdır. Özellikle kolektör giriş ve çıkışlarında kasanın tam sızdırmazlığı sağlanmalıdır. Yapımda kullanılan malzemelerin ısıl genleşmeleri dikkate alınarak boyutlandırılmalıdır (Acaroğlu, 2003).

2.5.1.6 Yalıtım

Güneş kolektörlerinde güneş ışınımı almayan yan ve alt bölümleri yalıtım malzemeleri ile yalıtılarak çevreye olan ısı geçişi önlenmelidir. Kolektörlerde yalıtım malzemesi olarak strafor, cam yünü, köpük ve poliüretan kullanılmaktadır. Yalıtım malzemeleri ısı iletim katsayısı, sıcaklık, yoğunluk, mukavemet, neme direnç, yanıcılık ve fiyat gibi özellikleri dikkate alınarak seçilmesi gerekir. Uygulamada en çok kullanılan yalıtkan yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan cam yünüdür. Çizelge 2.3'te bazı yalıtım malzemelerinin özellikleri verilmiştir (Kılıç ve Öztürk,1983).

Çizelge 2.3 : Bazı yalıtım malzemelerinin özellikleri

Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı, (W/mK)	Çalışma Sıcaklığı, (°C)	Yoğunluğu (kg/m^3)
Cam yünü	0,032	250-500	15-120
Taş yünü	0,036-0,055	650-1050	-
Polystrene köpük	0,029	70-80	20
Poliüretan köpük	0,023	104	35
PVC	0,035	100-130	40-80
Kalsiyum silikat	0,055	650	-
Perlik	0,048	820	-
İsocyanurate	0,25	121	-
Fenolik köpük	0,033	135	-
Gözenekli plastik	0,040	100	-

2.5.2 Kolektörlerin Isıl Analizi ve Modellenmesi

Kolektör üzerine gelen güneş ışınımının bir kısmı saydam örtüde yansır, bir kısmı yutulur ve geri kalan kısmı yutucu yüzeye ulaşır. Yutucu yüzeye gelen enerjinin bir kısmı taşıyıcı akışkana geçerken (faydalı ısı), bir kısmı kolektörde toplanır, geri kalan ışınım, taşınım ve iletimle çevreye gider.

Faydalı ısı Q_u Hottel-Whillier-Bliss denklemi ile gösterilmektedir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$Q_u = A_c.F_R.\left(I_e.(\tau.\alpha) - U_L.(T_i - T_a)\right) \quad \textbf{(2.31)}$$

Kolektörlerde ısı taşıyıcı akışkana (suya) aktarılan faydalı ısı (kolektörden elde edilen faydalı enerji) , yutucu levhanın yuttuğu güneş enerjisi ile çevreye olan ısı kaybının farkı kadardır. Kolektörden etrafa olan ısı kayıpları kolektörün güneş gören yüzünde taşınım ve ışınımla yan yüzlerinde ve arka yüzünde ise taşınım ile olur.

Kolektöre gelen anlık güneş ışınımın τ kadarlık oranı saydam örtüden geçebilir, geçen ışınımında α kadarlık bir kısmı yutucu yüzey tarafından yutulur, dolayısıyla kolektör tarafından yutulan güneş ışınımı τ ve α değerlerine bağlıdır. τ ve α alacağı değerler malzemelerin ve gelen ışınımın açısının fonksiyonudur. Kolektöre gelen anlık güneş ışınımın bileşenleri olan direkt, yayılı ve yansıyarak gelen ışınımlar kolektör üzerine farklı açılardan düşerler bu nedenle τ ve α , ışınımların ağırlıklı oranları göz önüne alınarak hesaplanır.

Kolektörün her bir bileşeninden çevreye olan ısı kayıpları değişik ısı geçiş mekanizmalarıyla olur. Yutucu levhadan saydam örtüye ve saydam örtüden dış ortama olan ısı geçişi taşınım ve ışınım yoluyla, kolektörün yan ve arka yüzeylerinden ise taşınım yoluyla olur. Kolektör toplam ısı geçiş katsayısı olan U_L ve sıcaklık farkı ($T_i - T_a$), bütün levhanın T_i sıcaklığında olduğunu kabul ederek kolektör levhasından olan ısı kaybını göstermektedir, fakat kolektörle akışkanın aynı sıcaklıkta olması kolektörden akışkana ısı geçişi olmayacağı anlamına gelir. Gerçekte kolektör levha yüzeyi T_i sıcaklığından çok daha yüksek sıcaklıkta olmakta ve kolektörün çevreye olan ısı kaybı U_L ve $(T_i - T_a)$ çarpımından daha yüksek değer almaktadır. Güneşten elde edilen gerçek kullanılabilir enerji değeri ile hesaplanan değer arasındaki fark kolektör ısıl kazanç faktörü (F_R) ile giderilmektedir. F_R hesaplanan kullanılabilir enerji değerini düşürmektedir ve bu yolla gerçek kayıp değeri kullanılmış gibi etki göstermektedir. F_R değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$F_R = \left(\frac{\dot{m}.c_p}{A_c.U_L}\right).\left[1 - \exp\left\{-\frac{(U_L.F_f.A_c)}{(\dot{m}.cp)}\right\}\right] \qquad \textbf{(2.32)}$$

Ayrıca F_R değerinin içerdiği kolektör verim katsayısı F_f'in hesabı aşağıda verilmiştir.

$$F_f = \frac{1}{U_L.W.\left[\frac{1}{U_L.\left(D_o + (W - D_o).\phi\right)} + \frac{1}{(\pi.Di.h_{fi})}\right]}$$

$$\phi = \frac{\tanh\left[mm.\frac{(W - D_o)}{2}\right]}{\left[mm.\frac{(W - D_o)}{2}\right]} \qquad \textbf{(2.33)}$$

Kolektörlerden çevreye olan ısı kaybı kolektörün üstü, altı ve yanları olmak üzere 3 bölgeden gerçekleşir.

$$U_L = U_T + U_B + U_S \qquad \textbf{(2.34)}$$

Kolektörün üst tarafının ısı geçiş katsayısı eşitliğiyle hesaplanır.

$$U_T = \left(\frac{N}{\left(\frac{C}{T_{pm}}\right).\left(\frac{\left(T_{pm} - T_a\right)}{\left(N + f\right)}\right)^{0,33}} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} + \frac{\sigma.\left(\left(T_{pm}\right)^2 + \left(T_a\right)^2\right).\left(T_{pm} + T_a\right)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,05.N.(1-\varepsilon_p)} + \frac{2.N + f - 1}{\varepsilon_c} - N} \quad \textbf{(2.35)}$$

Buradaki N değeri cam örtü sayısıdır.hw değeri ise rüzgar hızına bağlı olarak ortaya çıkan ısı taşınım katsayısıdır ve (2.36) eşitliğiyle hesaplanır. V_r m/s cinsinden ortalama rüzgar hızıdır.

$$h_w = 5,7 + 3,8V_r \quad \textbf{(2.36)}$$

f ve C değerlerinin bağıntıları ise aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir.

$$f = \left(1 - 0,04.h_w + 0,0005.h_w^{\,2}\right).\left(1 + 0,091.N\right)$$
$$C = 365,9\left(1 - 0,00883.s + 0,0001298.s^2\right) \quad \textbf{(2.37)}$$

Kolektörden gerçekleşen ısı kaybı için U ısı geçiş katsayısı ampirik formulü 1975 yılında S.A.Klein tarafından "Calculation of Flat Plate Collector Loss Coefficients" adlı çalışmasında verilmiştir. Kenarlardan ve alttan olan ısı kaybı katsayıları ise aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$U_b = \frac{k_i}{\delta_b}$$
$$U_s = \frac{\left(\left(L_1 + L_2\right).L_3.k_i\right)}{\left(L_1.L_2.\delta_s\right)} \quad \textbf{(2.38)}$$

Böylece kolektörlerde ısı taşıyıcı akışkana aktarılan faydalı ısı elde edilmiş olur.

Kolektörlerde kullanılan ısı taşıyıcı akışkanlar yardımıyla enerji istenen ortama aktarılır. Donmaması, korozif olmaması nedeniyle, hava ideal bir ısı transfer akışkanıdır. Fakat ısı transfer özellikleri yetersizdir. Su ise kolay tutuşmaz, ucuz ve zehirsizdir. Bazı metallere karşı da korozif etkisi yoktur. Ayrıca ısı transfer özellikleri de çok iyidir. Ancak tek sorun donma noktasıdır. Soğuk iklimlerde ısı transfer akışkanı olarak su yerine glikol-su çözeltileri, etil alkol-su karışımları kolektör devrelerinde kullanılır.

Soğuk iklim bölgelerindeki don tehlikesi, çalışma akışkanı su olan sistemler için büyük problemdir. Donma tehlikesine karşı alınabilecek en basit önlemlerden biri kolektör devresindeki akışkan sıcaklığını donma noktasının birkaç derece üstüne çıkarmaktır. Bu da don tehlikesinin olduğu saatlerde sıcak su deposundaki suyu sistem pompalı ise, sirküle ederek sağlanabilir. Ancak bu önlem çok soğuk olmayan ve don tehlikesinin yılda birkaç günü geçmediği ılıman iklim kuşakları için uygundur. Soğuk iklim bölgelerinde ise böyle bir önlem pahalı çözümdür.

Don tehlikesine karşı alınabilecek en uygun önlem kolektör devresinde antifriz çözeltileri veya uygun ısı transfer akışkanları kullanmaktır. Sistemde kullanılacak ısı transfer akışkanlarının termodinamik ve akışkanlar mekaniği özelliklerinin yeterli düzeyde olması, kolektör, ısı degiştirgeci, bağlantı elemanları ile kimyasal ve mekanik etkileşimi olmaması önemlidir.

2.5.2.1 Kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları

Genellikle kolektör giriş sıcaklığı veya giriş sıcaklığı ilk değeri bilinerek kolektör çıkış sıcaklığını aşağıdaki bağıntıyı kullanarak hesaplamak mümkündür. Kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, faydalı güneş enerjisinin verdiği ısıyla alakadardır.

$$\mathrm{T_o} = \mathrm{T_i} + \frac{Q_u}{\left(\mathrm{m.c_p}\right)} \qquad \textbf{(2.39)}$$

2.5.2.2 Kolektör anlık verimi

Kolektörde toplanan enerjinin, kolektör üzerine gelen güneş ışınımına oranı kolektör verimi olarak ifade edilir. Anlık kolektör verimi;

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_u}{A_c.I_e} = \frac{\dot{m}.c_p.(T_o - T_i)}{A_c.I_e} \qquad \textbf{(2.40)}$$

şeklinde ifade edilir.

3. DEPOLAMA

Güneş enerjili sistemlerde depolama yapılmadığı takdirde, ışınım sürekli gelmediğinden sadece belirli zaman aralıklarında yarar sağlayabilmektedir. Güneş enerjisi dışında enerji tüketimi olduğu zamanlarda yardımcı enerji kullanılarak bu sorun giderilebilmektedir. Ancak güneş ışınlarının gelmediği zamanlarda depolama yapılması durumunda yardımcı kaynaktan çekilen enerji de azalacaktır.

Genel olarak enerji depolaması aşağıdaki şekillerde yapılmaktadır;

a. Kimyasal enerji depolama (termo kimyasal, elektrokimyasal)

b. Mekanik yöntemlerle enerji depolama (hidroelektrik, volan vs.)

c.Elektrik enerjisi depolama (magnetik alanla)

d. Isıl yöntemlerle enerji depolama (duyulur ısı, gizli ısı)

Konutlarda genel olarak güneş enerjili ısıtma ve sıcak su sistemlerinde ısıl enerji depolaması yöntemi kullanulmaktadır. Gizli ısı değişimi faz değişimiyle olmaktadır, ısının maddenin ısı kapasitesi dolayısıyla depolanması ise hissedilir ısı depolamasıdır. Havalı ısıtma sşstemlerinde ve seralarda ise genelde depolama çakıl taşlarıyla yapılır. Çakıl taşlarının ucuz ve kolay temin edilebilir olması bu sistemlerin avantajlarıdır.Ancak çakıl taşları arasında havanın dolaştırılabilmesi için gerekli güç, suya göre daha fazladır.

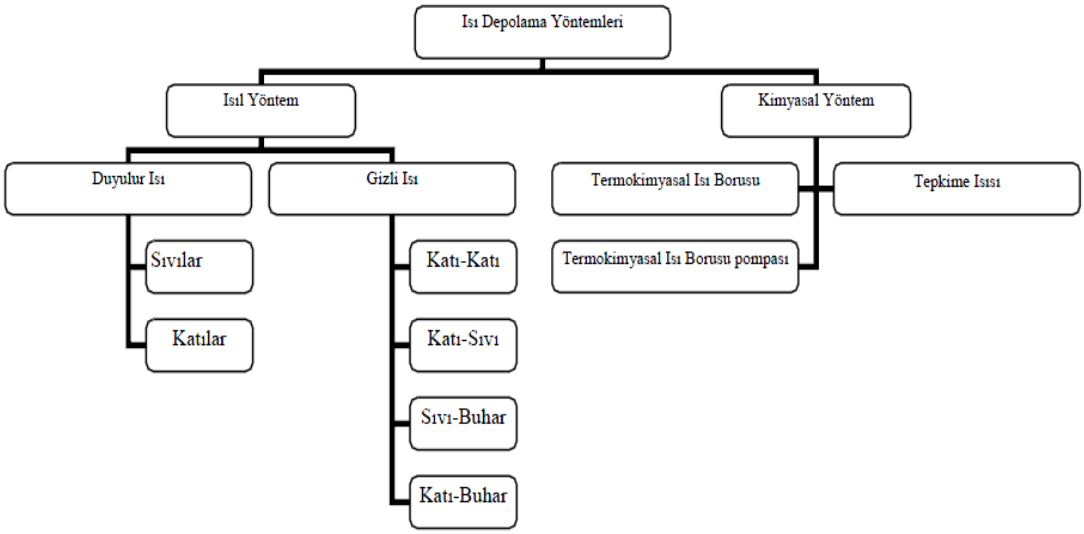
Sistemimizde kullanılan depolama yöntemi duyulur ısı depolama yöntemi olduğundan bu yöntem üzerinden gidilmiştir. Bu yöntemle birlikte yapılan hesaplamalarda depo sıcaklıkları değişimi su ile yapılan karıştırılmış depoya göre yapılmıştır.

3.1 Isıl Enerji Depolama

Isı depolama sistemini boyutları, uygulanan depolama sistemi ve ısı depolama materyallerine bağlı olarak, herhangi bir uygulama için düşük sıcaklıkta kısa veya uzun süre için ısı depolanabilir. Güneş enerjisi miktarı ve gereksinim duyulan enerji miktarı arasındaki farkın az olması durumunda, kısa süreli depolama uygulanır. Mevsimlik olarak gereksinim duyulan enerji miktarının güneş enerjisi ile karşılanması için uzun süreli ısı depolama uygulanarak, toplam enerji gereksinimin karşılanmasında güneş enerjisi katkısının artmasına imkan sağlanır. Enerjinin en düşük maliyetle sağlandığı ve süreye bağlı olarak kısa veya uzun süreli depolamaya karar verilir. Isı depolama yönteminin seçimi esas olarak, ısı depolama süresi, ekonomik uygulanabilirlik ve işletme şartlarına bağlıdır. Herhangi bir uygulama için ısı depolama yönteminin belirlenmesi, ısı depolamanın etkinlik ve ekonomikliği sistemin tasarımına bağlıdır.

Isı depolama sistemlerini tasarlarken dikkate alınması gereken bazı unsurlar vardır.Bu unsurlar; ısı depolama materyalinin birim kütle veya hacminin ısı depolama kapasitesi, ısı depolama, geri kazanma sıcaklığı ve yöntemi, ısı depolama ve geri kazanma işlemleri için enerji gereksinimi, sıcaklık gradyeni, sistem bileşenlerinin boyutlandırılması, ısı deposu malzemesi, şekli boyutları ve düzenlenmesi, depolama ünitesinin yalıtımı ve ısı kayıplarının kontrolü, depolanan enerjinin kullanılacağı ortamın özellikleri ve sistemin toplam maliyeti olarak sayılabilir.

Genel olarak, birim hacimdeki iç enerji değişiminin fazla olduğu ısı depolama maddelerinin kullanılması durumunda, ısı depolama için gerekli hacim azalır. Güneş enerjisinin 0-90°C sıcaklık aralığında düşük sıcaklıkta ısı enerjisi olarak depolanmasında uygulanan yöntemler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3. 1:Güneş enerjisi düşük sıcaklık uygulamalarında depolama yöntemleri

Genel olarak güneş enerjisi depolama sistemleri ısı toplama ünitesi, ısı depolama ünitesi, ısı değiştirici, depolanan ısının yararlanacağı ortam, yardımcı enerji kaynağı ve kontrol sisteminden oluşmaktadır.

Bir ısı depolama sisteminde bulunması gereken özellikler aşağıda verilmiştir (Baylin, 1979).

- Isı depolama maddesinin birim kütle veya hacim için ısı depolama kapasitesi yüksek olmalıdır.
- Isı depolama maddesi çalışma sıcaklığı aralığında uygun özelliklere sahip olmalıdır.
- Depolama ünitesinin sıcaklığı mümkün mertebe sabit olmalıdır.
- Isı depolama maddesi korozif, toksit etkili ve yanıcı özellikte olmamalıdır.
- Isı depolama ve geri kazanma etkinliği yüksek olmalıdır.
- Isı depolama ve kazanma etkinliğinde azalma olmaksızın, çok sayıda depolama ve geri kazanma çevrimi gerçekleştirebilmelidir.
- Sistemde depolanan ısı bütünüyle geri kazanılabilmelidir
- Tesis ucuz ve kullanım süresi uzun olmalıdır.

Ekonomik olarak kabul edilebilir bir sistemde, ısı depolama maliyeti düşük olmalıdır. Bu durum, ısı depolama maddesinin maliyetinin düşük olmasının yanı sıra, depo ve ısı değiştirici maliyetlerinin de kabul edilebilir değerlerde olmasıyla mümkündür. Depolama sistemi kapasitesinin belirlenmesinde, güneş ışınım enerjisi, kullanılacak sistemlerde gerekli ısı miktarı ve depolama için tüketilen enerji miktarı esas alınır.

3.1.1 Isıl Enerji Depolamasında Su Kullanımı

Duyulur ısı depolanmasında en yaygın kullanılan maddelerden birisi sudur. Su ile duyulur ısı depolanmasının çok sayıda avantajı mevcuttur.

- Su ucuzdur ve kolay temin edilebilir.
- Enerji depolanmasında faydalanılırken aynı zamanda enerji kolektör akışkan olarak da kullanılabilir.
- Fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri iyi bilinmektedir.
- Isı depolama özelliği iyidir. (hacimsel özgül ısısı büyüktür)
- Isı geçişi ve akışkan dinamiği iyi bilinmektedir.
- Isıtma ve soğutma sistemleri için gerekli sıcaklık aralığında kararlı bir buhar
- dengesine sahiptir.
- Toksitlenme ve alevlenme özelliği yoktur.
- Korozyon etkisini azaltan inhibitör teknolojisi gelişmiştir.

Suyun duyulur ısı depolamasındaki bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Su donduğunda genişlediğinden, donmaya karşı tedbir alınmalıdır. Korozyon yapıcı özelliğinden dolayı depo içerisine inhibitör ilave edilmelidir. Ayrıca suyun erime ve kaynama sıcaklıkları arasındaki fark küçüktür. Yüksek sıcaklıklarda enerji depolaması yapmak zordur.

Genel olarak su dolu bir tank sistem olarak göz önüne alınırsa enerji dengesi şu şekilde yazılabilir.

$$\rho_s . V_s . C_s . \frac{dT_s}{dt} = Q_u - Q_L - Q_s \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada; Q_u kolektörden gelen ısı miktarı, Q_L ihtiyaç için çekilen ısı miktarı ve Q_s depo çevresine olan ısı kaybıdır. Eşitlik (3.1)'de görüldüğü üzere, depodaki suyun sıcaklığının değişimi depodaki suyun ısı kapasitesi ile depoya gelen, depodan çekilen ve kayıp olan ısı miktarına bağlıdır. Uygulamada, depodan çevresine ısı kaybı sürekli olmasına (depo sıcaklığı çevre sıcaklığına ininceye kadar) rağmen, depodan çekilen vekolektörden depoya verilen enerji dışında enerji girişi ve çıkışı olmayabilir. Depo içindeki suyun sıcaklığı her noktada aynı değildir. Üst ve alt kısımları arasında sıcaklık gradyeni vardır. Depo sıcaklığının üniform olması için karıştırılması gereklidir (Kılıç ve Öztürk,1983).

Karıştırılmamış depolarda tabakalaşmaların olduğu bölümlere ayırarak ısıl analiz yapmak mümkündür. Bu tip depolarda kolektörden gelen ve yüke gidecek borulamalar deponun üst kısmına yerleştirilerek daha verimli kullanım sağlanabilir.

3.1.2 Karıştırılmış Depo

Bir karıştırılmış depolama sisteminde kolektörden gelen akışkanın depoya giriş sıcaklığının sürekli fonksiyonlarla ifadesi zordur.Bu yüzden nümerik çözümler kullanılır. (3.2) eşitliğindeki diferansiyel denkleme sonlu farklar metodu uygulanırsa eşitlik

$$T_{s,1} = T_{s,0} + \frac{\Delta t}{\rho_s . V_s . C_s} . \left[Q_u - Q_L - Q_s \right] \qquad \textbf{(3.2)}$$

şeklini alır. Böylece Δt süre aralıklarla depo sıcaklığı tayin edilebilir.

Depodan çevresine olan ısı kaybı (3.3) eşitliğiyle hesaplanır.

$$Q_s = UA_s . (T_s - T_a) \qquad \textbf{(3.3)}$$

Burada U deponun malzemesi ve yalıtım malzemesiyle ilgili ısı geçiş katsayısıdır.

Depo kaybı hesabı yapılırken deponun şekli, bulunduğu yer gibi parametreler de önemlidir. Sistemimizde kullanılan depo silindirik depo olarak seçilmiştir ve UA_s değeri (3.4)eşitliğiyle hesaplanmıştır.

$$UA_s = U_1 . \pi . (2 . r_1) . h_s + U_2 . 2 . \frac{\pi}{4} . (2 . r_2)^2 \qquad \textbf{(3.4)}$$

(3.4) eşitliğindeki U_1 ve U_2 değerleri sırasıyla silindir depolama tankının iç çapına bağlı olarak hesaplanan ısı geçiş katsayısı ve tankın düz olan üst ve alt yüzeylerinden olan ısı geçiş katsayısı olarak verilir. Deponun ısıtılmayan, çevresi hava olan bir ortamda bulunmaktadır. Bu katsayılar tankın çapı ve yalıtım malzemesinin kalınlığına bağlı olarak aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$\frac{1}{U_1} = \frac{1}{h_s} + \frac{r_2}{k_y} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$U_2 = \frac{k_y}{\delta_{yk}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Depo çevresi sıcaklığı sabit 13°C kabul edilerek buna göre ısı kaybı hesabı yapılmıştır.

Kolektörden çekilen ısı miktarı, depoya giriş ve depo sıcaklığı arasındaki fark baz alınarak eşitlik (3.6) ile hesaplanır.

$$Q_u = \dot{m} c_p . (T_o - T_s) \qquad \textbf{(3.6)}$$

İhtiyaç için çekilen ısı ise depo sıcaklığı ve ısıl yük geri dönüş suyu sıcaklığı arasındaki ısı kaybı bağıntısını veren ifade ise eşitlik (3.7) ile hesaplanır.

$$Q_L = \dot{m}_L c_p . (T_s - T_{yük}) \qquad \textbf{(3.7)}$$

3.1.3 Geri Dönüş Suyu Sıcaklığı Tayini

Isıl yük geri dönüş sıcaklığının tespiti için yıl boyunca dış hava sıcaklığına bağlı olarak ısıtma sistemi gidiş ve dönüş sıcaklıkları belirlenir. Klasik radyatörlü-kazanlı merkezi sıcak sulu ısıtma sistemlerinde kullanılan 90/70°C tasarım gidiş-dönüş sıcaklıkları, dış hava sıcaklıklarına göre değişim gösterirler. Kazan çıkış (ısıtıcı giriş) sıcaklığı olan 90°C en soğuk zamana göre ayarlanmıştır. Isıtıcı giriş sıcaklıklarının dış havaya göre değişimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Isıtıcı giriş sıcaklıklarının dış havaya göre değişimi

$T_{dış}$	90/70	50/40
15	41	30
12	51	30
10	56	31,11111
9	59	32,77778
8	62	34,44444
7	65	36,11111
6	67	37,22222
5	70	38,88889
4	73	40,55556
3	75	41,66667
2	78	43,33333
1	80	44,44444
0	83	46,11111
-1	85	47,22222
-2	88	48,88889
-3	90	50

Sistemimizde güneş enerjisi ve ısı pompası gibi sistemlerde verimli olarak çalıştırabileceğimiz 50/40°C çalışma sıcaklığına göre modelleme yapılmıştır.

Isıtıcı dönüş sıcaklıkları ise yazın sadece kullanma sıcak suyu ihtiyacı olduğundan şebeke suyuna eşit ($T_{şebeke}$ = 13°C) kabul edilerek, kışın ise radyatörlerden dönüş sıcaklıkları baz alınarak belirlenir.

$$T_{dönüş} = 2.\left(\frac{Q_{yük}}{UA_{rady} + T_{set}}\right) - T_{gidiş} \quad \textbf{(3.8)}$$

eşitliğiyle dış hava sıcaklığı ve ısıl yüke göre dönüş sıcaklığı belirlenir.

UA_{rady} değeri ise gidiş-dönüş sıcaklıklarına göre (3.9) eşitliği yardımıyla elde edilir (Ljunggren, 2006).

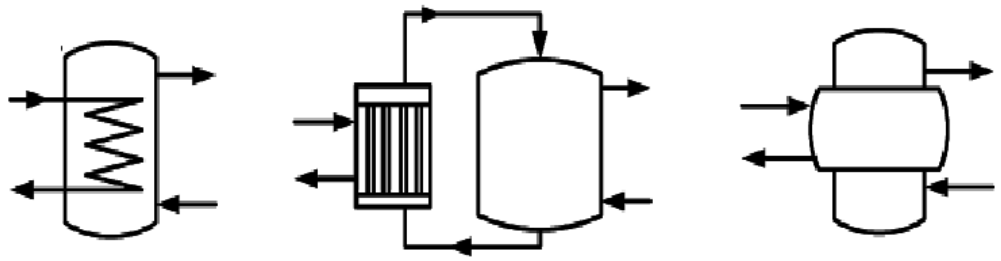
$$UA_{rady} = \frac{Q_{yük}}{\left(\frac{50 - 40}{\ln\left(\frac{50-20}{40-20}\right)}\right)^{0.33}} \quad \textbf{(3.9)}$$

3.1.4 Isı Değiştiricisi

Kolektörden toplanan ısının depoya transferi için genelde kolektör ile depo arasına veya depo içine ısı değiştiricileri konulmaktadır. Kolektörde dolaştırılan sıvı antifrizli çözelti olduğundan depolama suyu ile karışması önlenmelidir.

Güneş kolektörü ve depo ile ısı değiştiricisinin çeşitli bağlanma yöntemleri mevcuttur.

Suya daldırılmış spiral tip ısı değiştiricisi ,gövde boru tipi ısı değiştiricisi ve mantolu tip ısı değiştiricisi Şekil 3.2'de sırasıyla gösterilmektedir. (Dwivedi, 2009)



Şekil 3.2 : Depo ve ısı değiştiricisi tipleri ile bağlanma şekilleri

Isı değiştiricisi hesabı yapılırken NTU (transfer birimleri yöntemi) metodundan yararlanılmıştır. Buna göre NTU (3.10) eşitliğiyle aşağıda görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$\mathrm{NTU} = \frac{(\mathrm{ua}_x)}{(\mathrm{m.cp})} \tag{3.10}$$

Düşük debili akışkan (kolektörden gelen) ile yüksek debili akışkanın (depolama tankından gelen) oranı (3.11) eşitliğiyle ifade edilir.

$$\mathrm{C} = \frac{(\mathrm{m.cp})}{\mathrm{m}_{\mathrm{tank}}.\mathrm{cp}_{\mathrm{tank}}} \tag{3.11}$$

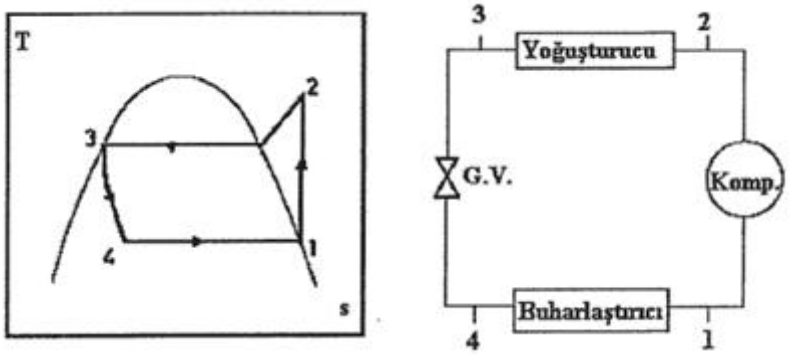
Isı değiştiricisinin etkenliği ise (3.12) eşitliği ile hesaplandıktan sonra kolektör ve depo sıcaklıkları arasındaki ısı alışverişi rahatlıkla belirlenir.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(\mathrm{NTU}.(\mathrm{C}-1))}{1 - \mathrm{C}.\exp(\mathrm{NTU}.(\mathrm{C}-1))} \tag{3.12}$$

4. ISI POMPASI

Doğada ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama kendiliğinden geçer. Isının bunun aksi istikamette geçişinin sağlanabilmesi için ise bir soğutma makinesinin ya da ısı pompasının kullanılması gerekir. Isı pompasının kullanımındaki amaç, ısıtma aylarında düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından ısı çekerek, bu ısıyı yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına aktarmaktır. Isı pompası ile soğutma makinesini birbirinden ayıran tek fark kullanım amaçlarıdır. Termodinamik açıdan temelde aralarında temel bir fark bulunmamaktadır. Isı pompalarında, kondenserde yüksek sıcaklıkta dışarı atılan ısıdan su, hava veya başka bir akışkanın ısıtılması sağlanır.

Termodinamiğin II. yasası, ısının düşük sıcaklık seviyesinden yüksek sıcaklık seviyesine transferi için yardımcı bir enerji kaynağının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu enerji ihtiyacı mekanik veya elektrik enerjisi şeklinde karşılanabildiği gibi ısı enerjisi şeklinde de karşılanabilmektedir.



Şekil 4.1 : Isı pompası prensip şeması

4.1 Isı Pompalarının Sınıflandırılması

4.1.1 Isı Kaynakları

Isının çekildiği ve atıldığı kaynakların aynı sıcaklıkta olmaları halinde, ısı pompası maksimum verimle çalışır. Dolayısıyla mümkün olan en sıcak kaynak, ısı pompası için en uygun kaynaktır. Ancak, kaynak sıcaklığının doğrudan kullanıma imkan vermeyecek bir değerde olması gerekir. Aksi takdirde ısı pompasına gerek duyulmaz. Isı pompalarında hava, su, toprak ve güneş enerjisi olmak üzere baslıca dört kaynaktan yararlanılır. Bunlardan ilk üçü tek başlarına kullanılabilmekle beraber, güneş enerjisi genellikle yardımcı kaynak olarak kullanılmaktadır. (Ataman, 1991).

4.1.1.1 Hava

Hava, ısı pompası için ucuz, bol ve her yerde bulunabilen bir ısı kaynağıdır. Bu sebeple tüm ülkelerde kullanılır. Hava kaynaklı ısı pompalarının en büyük avantajları, sürekli bulanabilmesinden başka, genis bir uygulama alanın bulunması; kullanılan ekipmanların makul boyutlarda olması ve nispeten düşük isletme ve yatırım maliyetleri gerektirmeleridir. Ayrıca kompakt halde çok geniş çalışma şartlarına uygun olarak, nispeten ucuza üretimleri yapılabilmektedir. Hava kaynaklı ısı pompalarının iki büyük dezavantajı vardır:

1) Hava sıcaklığının çok değişken olması

2) Buzlanma problemi

Isı ihtiyacımızın yüksek olduğu anlarda kaynak yani hava sıcaklığı düşüktür. Soğutma yükünün fazla olduğu zaman da, hava sıcaklığı yüksektir. Bu da, ısı pompasının ısıtma ve soğutma kapasitelerinin düşmesine neden olur. Bu durumda ya cihaz minimum ve maksimum sıcaklıklardaki kapasiteleri karsılayabilecek şekilde seçilir ya da ek bir sisteme ihtiyaç duyulur. Isı kaynağı sıcaklığının çok değişken olması, projelendirmeyi ve ekipman seçimini zorlaştırır (Ataman,1991)

4.1.1.2 Su

Kuyulardan, göllerden, nehirlerden, denizden, şehir şebekesinden ve üretim tesislerinden elde edilebilen su, ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Kuyu suyu, 45-150 metre derinlikte ve kuzey ülkelerinde, yaklasık 10°C, güney ülkelerinde ise yaklasık 16°C civarındadır. 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; değişim havada olduğu kadar değildir. Ülkemizde yer üstü sularının genellikle 0°C'nin altına düşmemesi de ayrıca bir avantajdır(Ataman, 1991).

4.1.1.3 Toprak

Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması, diğer sistemlere göre daha pahalıdır. Toprak kaynaklı ısı pompaları, buharlaştırıcısında topraktan çekilen ısıyı kullanan ısı pompalarıdır. Toprakla olan ısı alışverişi, toprağa yatay veya dikey olarak gömülmüş toprak ısı değiştiricileriyle gerçekleştirilir. Toprak altına gömülen borulardan doğrudan soğutucu akışkan veya daha ucuz olması bakımından genellikle salamura geçirilir. Su veya salamura, toprak ısı değiştiricisini oluşturan borulardan geçirilerek elde edilen ısı enerjisi, ısı pompasındaki buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktarılır. Toprak kaynaklı ısı pompalarında her ne kadar ısı kaynağı toprak ise de, ısı topraktan sıvı akışkan vasıtası ile çekildiğinden, kullanılan ısı pompaları su (salamura)/hava, su (salamura)/su ısı pompalarıdır. Toprağın yoğunluğu, bileşimi, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği, toprak ısı değiştiricisinin seçimini ve boyutlandırılmasını etkiler. Toprak özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi projelendirme de güçlük yaratan sebeplerden birisidir. Aynı şekilde ısı pompası da çalıştırıldığı andan itibaren toprağın özelliklerini etkiler. Soğuk yörelerde, ısıtma yapıldığı süre içerisinde toprağa yeteri kadar ısı girişi olmazsa; kış aylarında topraktan sürekli çekilen ısı nedeniyle, toprağın donması tehlikesi de mevcuttur. Ancak, toprak sıcaklığının havaya göre genellikle daha uygun sıcaklıklarda ve sıcaklık değişiminde bulunması, ayrıca salamura-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerinin, hava-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerine göre daha az bir sıcaklık farkında çalışabilmeleri, toprak kaynaklı ısı pompalarını, hava kaynaklı ısı pompalarına göre avantajıdır (Ataman, 1991).

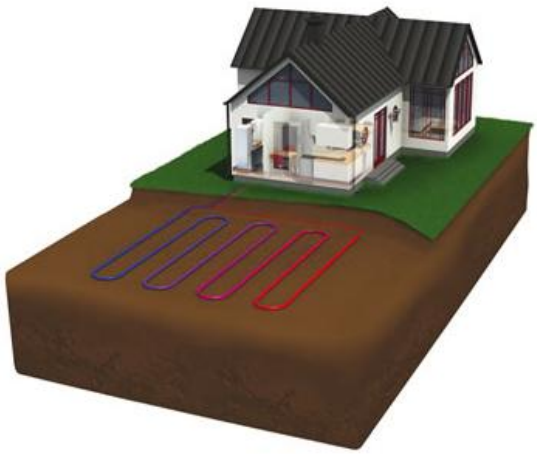
4.1.1.4 Güneş

Isı kaynağı olarak güneş enerjisinden yaralanmanın en büyük avantajı, ısı pompası buharlaştırıcı sıcaklığının yüksek seçilebilmesine imkan vermesidir. Dolayısıyla ısıtma etkinliği yükselmiş olur. Güneş enerjisinden yararlanan ısı pompası sistemleri, daha düşük kolektör sıcaklığında çalıştıklarından, kolektör verimi diğer güneş enerjisi sistemlerinde olduğundan yüksektir. Kaynak olarak güneş enerjisinden yararlanıldığında iki temel sistem söz konusudur. Bunlar direkt ve endirekt sistemlerdir. Direkt sistemlerde kolektörler buharlaştırıcı görevi görür. Endirekt sistemlerde ise kolektörden su veya su buharı geçirilerek kaynak olarak bunlardan yararlanılır. Ancak, hava kaynağında olduğu gibi, ısı ihtiyacının yüksek olduğu günlerde güneş enerjisi de az olduğundan ek bir ısıtma sistemine gerek vardır (Ataman, 1991).

4.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemi İle İlgili Temel Kavramlar

Toprak kaynaklı ısı pompası toprağı ısı kaynağı veya ısı çukuru olarak kullanan bir ısı pompası sistemidir. Toprak kaynaklı bir ısı pompası toprakla, toprak ısı değiştiricisi yardımıyla ilişkilendirilmiştir. Yatay ve dikey yerleşim olmak üzere temelde iki tip uygulaması vardır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te bu iki temel düzen görülmektedir.

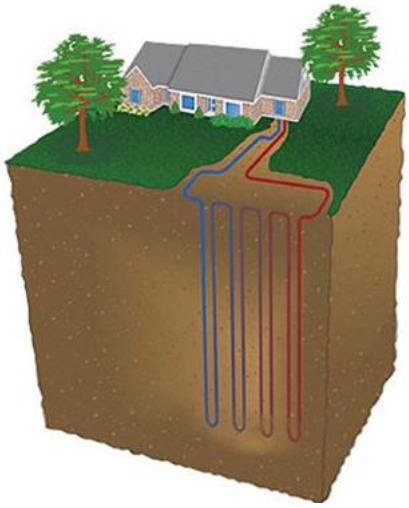
Güneş ışınlarının yeryüzüne çarpmasıyla jeokütlede depolanan ısı enerjisini yaşam alanlarına aktarmak amacıyla, toprak kaynaklı ısı pompaları tasarlanmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompasının diğer ısı pompası sistemlerinden farkı, toprak kaynaklı sistemlerde, ısı taşıyan akışkan ile jeokütlenin bir toprak ısı değiştiricisi kullanılarak birleştirilmesidir. Toprak ısı değiştiricisi doğrudan genleşmeli veya ikincil akışkanlı olabilir. Doğrudan genleşmeli tipte toprak ısı değiştiricisi ara bir ısı değiştiricisi olmadan doğrudan buharlaştırıcı veya yoğuşturucu olarak kullanılır. İkincil akışkanlı tipte ise, ısı pompası ile toprak arasındaki ısı transferi ikincil bir devre ve ikincil bir akışkan (su veya antifrizli su çözeltisi) ile sağlanır.



Şekil 4.2 : Yatay toprak ısı değiştiricili sistem

Büyük ısıl kapasitesi ve kararlı işletme koşulları toprağı ısı kaynağı veya çukuru olarak kullanmayı cazip hale getirir. Yaklaşık 2 m derinlikteki toprak sıcaklığı o bölgedeki yıllık ortalama hava sıcaklığı kadardır ve çok az değişim gösterir. Bu, havayla karşılaştırıldığında, ısıtma için yüksek sıcaklıkta ve kararlı bir kaynak sıcaklığı ve soğutma için düşük ve kararlı bir çukur sıcaklığı sunar. Bu nedenle toprak kaynaklı ısı pompaları hava kaynaklı ısı pompalarıyla karşılaştırıldığında daha az enerji tüketir.

Aynı iklim şartlarında toprak kaynaklı ısı pompaları hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksek etkinlik değerlerine sahiptirler. Bunun nedeni daha uygun sıcaklık aralıklarında çalışmalarıdır (Piechowski ve Charters, 1995).



Şekil 4.3 : Düşey toprak ısı değiştiricili sistem

Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması hava ve su kaynaklı sistemlere göre daha pahalıdır. Toprağın altına gömülen borulardan oluşan sisteme toprak ısı değiştiricisi denir. Bu borular yardımıyla, toprağın ısısı ısı taşıyıcı akışkana veya çevrimin atık ısısı, ısı taşıyıcı akışkandan toprağa aktarılır. Toprak altına gömülen borularda ısı taşıyıcı akışkan olarak, su ve antifriz karışımı veya doğrudan genleşmeli sistemlerde soğutucu akışkanın kendişi dolaşır. Toprağın içine gömülü borularda doğrudan soğutucu akışkan kullanmak soğutucu akışkan ihtiyacının artmasına sebep olur. Buna bağlı olarak soğutucu akışkanın pahalı olması nedeniyle, genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak boru içerişinde su ve antifriz karışımı dolaşır.

Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği toprak ısı değiştiricisinin seçimini ve boyutlandırılmasını etkiler. 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. Bu nedenle ısı pompası kapasitesi ve ısıtma tesir katsayısı da doğrudan etkilenir. Soğuk bölgelerde, 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 toprak, havaya göre daha uygun sıcaklıklara sahiptir ve sıcaklık değişimi daha kararlıdır. Ayrıca, salamura-soğutucu akışkan ısı değiştiricilerinin hava soğutucu akışkan ısı değiştiricilerine göre daha düşük sıcaklık farkında çalışması toprak kaynaklı sistemlerin bir diğer avantajlı yanıdır.

Toprak kaynaklı ısı pompası toprak ısı değiştiricisinin uygun derinliğe gömülmesi belirli miktarda hafriyat veya delme gideri gerektirerek ilk yatırım maliyetinin artmasına sebep olur. Bunun yanı sıra kullanılması halinde yatay toprak ısı değiştiricisinin belirli bir bahçe alanı gerektirmesi toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin kullanımını kısıtlayan bir diğer etkendir (Demir, 2006).

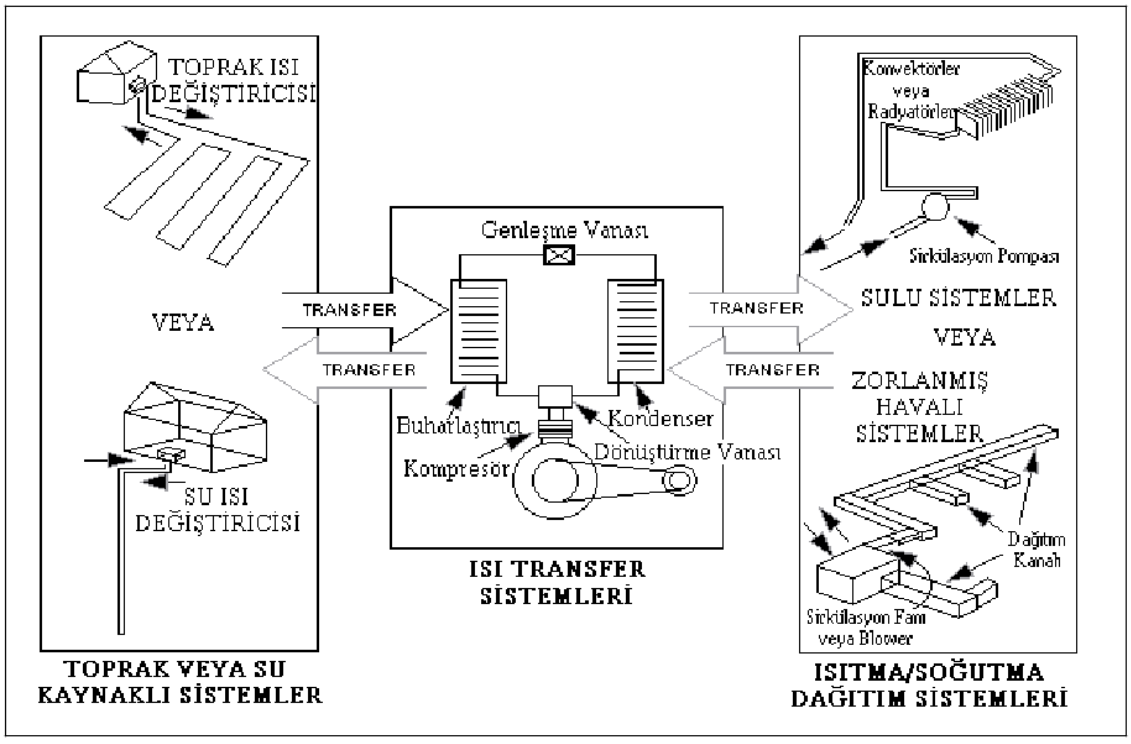
4.2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Çalışma Şekli ve Elemanları

Toprak kaynaklı ısı pompaları konutlarda ısıtma, soğutma ve nem kontrolü sağlar. Ayrıca, ilave ısıtma sağlayarak veya alışılagelmiş sıcak su üreticilerinin yerine geçerek sıcak su temininde de kullanılabilir. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde üç ana kısım veya alt sistem bulunmaktadır. Bunlar:

• Toprak ısı değiştiricileri: Isı taşıyıcı akışkan ile jeokütlenin temasının sağlayarak ısı alışverişine imkân sağlayan boru düzenleri,

• Isı pompası: Jeokütleden alınan ısıyı binaya aktaran sistem,

• Isı dağıtım sistemi: Bina içindeki mahalleri ısıtmak veya soğutmak için kullanılan sistem.



Şekil 4.4 : Toprak kaynaklı ısı pompasının sistem düzenleri

Ayrıca, bu sistemlerde binanın sıcak su ihtiyacını desteklemek amacıyla kızgın buhar soğutucusu veya sıcak su ihtiyacının tümünü karşılamak üzere sıcak su üreticisi bulunur. Isıtma sezonunda ısı, toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla toprak ısı değiştiricisinde dolaşan akışkandan çekilir ve hava kanallı sistemlerle veya sıcak sulu sistemlerle binaya dağıtılır. Soğutma sezonunda ise ısı, soğutulacak ortamdan çekilerek toprak kaynaklı ısı pompası yardımıyla toprak ısı değiştirgecine oradan da jeokütleye aktarılır (Demir, 2006).

4.2.1.1 Toprak Isı Değiştiricisi

Toprak ısı değiştiricileri, gömülerek jeokütle ile teması sağlayan boru düzenleridir. Isıtma sezonunda, jeokütlenin enerjisini ısı taşıyıcı akışkan yardımıyla ısı pompasının Buharlaştırıcışına aktararak soğutucu akışkanın buharlaşmasını sağlarken soğutma sezonunda da ısı pompasının yaşam alanlarından çektiği ısıyı ısı pompasının yoğuşturucusundan alıp jeokütleye atarak çevrimini tamamlar.

Toprak ısı değiştiricileri kapalı çevrim esasına göre çalışır. Toprak ısı değiştiricilerinde ısı taşıyıcı akışkanın yenilenmesine gerek yoktur. Dolayısıyla bu sistemlerde kullanılan ısı taşıyıcı akışkan miktarı değişmez. Aynı akışkan ısı pompasında kullanıldıktan sonra, tekrar ısıtılmak veya tekrar soğutulmak üzere toprak ısı değiştiricisinde dolaştırılır.

Boru düzenleri düşey veya yatay olabildiği gibi spiral, helisel ve benzeri geometrilerde de olabilir. Bu geometrileri belirlerken boruların birbirleriyle olan ısıl etkileşimleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Toprak kaynaklı ısı değiştiricilerinde toprağa gömülen borular polietilen malzemeden yapılmaktadır ve genellikle içlerinden su ve antifriz karışımı dolaştırılmaktadır. Yalnızca doğrudan genleşmeli sistemlerde su ve antifriz karışımı yerine ısı pompasının soğutucu akışkanı dolaştırılır. Bu durumda salamurayı dolaştırmak için ilave pompa ve ısı değiştiricisi ihtiyacı ortadan kalkar. Bu sistemlerde bakırdan yapılmış boru düzenleri kullanılır ve ara ısı değiştiricisi olmadığı için bu sistemler daha verimlidir (Demir, 2006).

4.2.1.2 Toprak Isı Değiştiricisi Türleri

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricileri üç ana grup altında toplanır.

• Kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricileri,

• Açık çevrimli toprak ısı değiştiricileri,

• Doğrudan genleşmeli toprak ısı değiştiricileri.

Kullanılan toprak ısı değiştiricileri ısı pompası sisteminin etkinliğini, işletme giderlerini ve ilk yatırım maliyetini etkiler. En verimli toprak ısı değiştiricisi türünün seçiminde coğrafi özelliklerin, arsa alanının ve sistem ekonomikliğinin göz önünde bulundurulması gerekir.

Kapalı Çevrimli Sistemler

Kapalı çevrimli sistemler yeraltına gömülü bir boru şebekesinden oluşur ve bu şebekeyi oluşturan yüksek güçlü plastik borular ısı değiştiricisi vazifesi görürler. Boru şebekesi ısı taşıyıcı akışkanla doldurulur ve genellikle ısı taşıyıcı akışkan olarak su veya su-antifriz karışımı kullanılır. Kapalı çevrimli sistemlerde, ısı taşıyıcı akışkanın borular içerişinde dolaşımını sağlamak üzere, bir pompa bulunur.

Tüm sistem göz önüne alındığında toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri soğutucu akışkan ile yaşam alanı arasında, ısı taşıyıcı akışkan ile soğutucu akışkan arasında ve ısı taşıyıcı akışkan ile jeokütle arasında toplam üç adet çevrim gerçekleştirirler. Soğutucu akışkan çevrimi ile ısı taşıyıcı akışkan arasındaki enerji alışverişi bir ısı değiştirici vasıtasıyla sağlanır. Bu ısı değiştiricisi, toprak ısı değiştiricisi ile ısı pompası sisteminin ortak bir elemandır ve soğutma sezonunda soğutucu akışkanın yoğuşmasını sağlarken ısıtma sezonunda buharlaşmasını sağlar. Yazın soğutma ihtiyaçları nedeniyle toprak ısı değiştiricisindeki akışkanın sıcaklığı artar ve soğutucu akışkandan aldığı bu ısıyı daha düşük sıcaklıktaki toprağa verir ve çevrimini tamamlar. Kışın ise ısıtma ihtiyaçları nedeniyle sıcaklığı düşen ısı taşıyıcı akışkan kaybettiği enerjisini kendinden daha yüksek sıcaklıkta olan topraktan alarak çevrimini tamamlar. Kapalı çevrimli sistemlerde toprak ısı değiştiricilerinin yatay, spiral, düşey ve yüzey suyuna daldırılmış değişik kurulumları vardır (Demir, 2006).

Düşey toprak ısı değiştiricileri genellikle arsa alanının kısıtlı olduğu durumlarda kullanılır. Kuyuların derinlikleri genellikle 22.9-91.4 m arasındadır. Kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricisindeki borular düşey kuyunun içerişinden geçirilirler. Toprak ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin tasarımında ısı değiştiricisinin döşenmesi gereken alanın azaltılmasının bir amaç olduğu düşünülürse, düşey toprak ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin diğer sistemlere üstünlüğü ortaya çıkar (Ataman, 1985).

Açık Çevrimli Sistemler

Açık sistemlerde, kapalı sistemlerdeki ısı taşıyıcı akışkan yerine, ısı kaynağı olarak kullanılan yerüstü veya yeraltı suyu doğrudan ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanılır. Açık sistemler öncelikle suyun çekildiği ana kuyulardan, ana ve enjeksiyon kuyularından veya yüzey su sistemlerinden oluşurlar.

Eğer ısı kaynağındaki su miktarı kısıtlı ise, ana kuyudan çekilen su ısı pompası ısı değiştiricisinde ısısını 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 verilir ve 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 yerüstü veya yeraltı suyu arasındaki ısı değiştiricisi kirlenme, korozyon veya tıkanma tehlikesi ile karşı karşıyadır. İkinci önemli faktör ısı kaynağı veya kuyusu olarak kullanılan su kütlesinin yeterliliğidir. Üçüncü önemli faktör dönüş suyunun ne yapılacağının belirlenmesidir. Dönüş yeraltı veya yerüstü 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 tasarımına bağlı olarak açık sistemler, tüm toprak kaynaklı ısı değiştiricileri kurulumlarından daha fazla pompalama yüküne ihtiyaç duyar. Bununla birlikte, ideal şartlarda, açık çevrim uygulaması toprak ısı değiştiricisi sistemleri içinde en ekonomik olanıdır (Demir, 2006).

Doğrudan Genleşmeli Sistemler

Yukarıda bahsedilen tüm toprak ısı değiştiricisi sistemlerinde toprakla soğutucu akışkan arasında ısı geçişi sağlamak için ikisi arasında bir ısı taşıyıcı akışkanlardan faydalanılır. Soğutucu akışkanla toprak arasındaki ısı geçişi döngüsünde ısı taşıyıcı akışkan kullanılması ısı pompası sisteminde sıkıştırma oranlarını yükseltir.

Doğrudan genleşmeli sistemlerde aradaki ısı taşıyıcı akışkana, ısı taşıyıcı akışkanla soğutucu akışkan arasındaki ısı değiştiricisine ve dolaşım pompasına gerek yoktur. Bakır borular soğutucu akışkan ile toprak arasındaki ısı geçişini doğrudan sağlamak için toprağın altına yerleştirilirler. Sonuç olarak, ısı geçişi özellikleri ve termodinamik performans artar. Borular, derin düşey çukurlara veya geniş yatay çukurlara gömülebilirler. Düşey yerleşimler kumlu, killi veya kuru topraklar için önerilmezler. Toprak ısı değiştiricisi metal olduğu için korozyona sebep olabilir. Kışın ısıtma amaçlı kullanımda, düşük toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı nedeniyle topraktaki nem donabilir. Biriken buzun genleşmesi borulara basınç uygulayarak bükülmesine sebep olabilir. Bu nedenle toprak ısı değiştiricileri donma potansiyeli olan yeraltı su tabakalarına yakın bölgelere yerleştirilmemelidir. Yazın soğutma amaçlı kullanımda, yüksek toprak ısı değiştiricisi sıcaklığı topraktaki nemin buharlaşmasına sebep olabilir. Buna bağlı olarak nem miktarının değişmesi toprağın ısı geçişi özelliklerini değiştirir. Toprakla doğrudan genleşmeli sistem arasında çok aşırı sıcaklık farkı mevcut olduğundan bu durumlar tasarım aşamasında göz önüne alınmalıdır (Demir, 2006).

4.2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompası

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



Şekil 4.5 : Paket tip toprak kaynaklı ısı pompası

Toprak kaynaklı ısı pompaları yaşam mahallerinin ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyacının üçünü birden sağlamaktadır. Özellikle sulu ısıtma ve kullanım sıcak suyunun sağlanmasında kazan ve donanımlarına ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ayrıca bu sistemlerde yakıtların yakılmasıyla kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi yerine ışının topraktan taşınarak elde edilmesi esas alındığından yakıt temini, depolanması ve maliyeti ortadan kalktığı gibi fosil kaynaklı yakıtların yakılmasıyla açığa çıkan çevre kirliliğinin de önüne geçilmiş olur. Tüm bunların yanı sıra toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanımı için özel bir elemana gerek yoktur.

Evlerdeki toprak 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 (Demir, 2006).

4.2.2.1 Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantaj ve Dezavantajları

Toprak kaynaklı ısı pompalarının mevcut 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 toprak kaynaklı ısı pompalarının ilk yatırımının daha yüksek olması, etkinliğinin toprak ısı değiştiricisine ve donanımlarına bağlı olması gibi sakıncaları da mevcuttur.

Toprak kaynaklı ısı pompaları aynı zamanda, büyük yapılarda yaygın olarak kullanılan merkezi ve değişken hava debili sistemlere kıyasla çok daha küçük fan ve pompa enerjisi gerektirir.

Konforu ve kısmi yükteki etkinliği sağlamak için karmaşık kontrol sistemleri gerekli olmadığından, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin maliyetini arttırmamak amacıyla, pahalı ve özel cihazların kullanılmaması önerilir. Her bölgede en iyi konforu sağlamak için yerel olarak kontrol edilebilen ayrı bir ısı pompası ile ısıtma veya soğutma yapılabilir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, göze hoş görünmeyen dış ünite olmadan kurulabilirler. Böylece dış etkenler, korozyon ve hava etkisi ile oluşabilecek sorunlara rastlanmaz. Tüm ısı pompası donanımı iç ünite şeklindedir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları tasarımda önemli ölçüde esneklik sağlar. 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 toprak kaynaklı ısı pompalarıyla sıcak su ihtiyacının karşılamak üzere kullanılabilir. Bu seçilen ısı pompalarındaki ısı geri kazanım ısı değiştiricileri ile veya sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulan sudan suya ısı pompası sistemleri yardımıyla gerçekleştirilebilir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, enerji ve bakım giderlerinin düşük olması ve donanım ömrünün uzun olması nedeniyle, yapım ve kullanım ömrü boyunca meydana gelen işletme giderleri göz önüne alındığında diğer sistemlerden daha avantajlıdır.

Tüm bu avantajlarına karşılık toprak kaynaklı ısı pompasının kullanımını kısıtlayan en önemli faktörler bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin diğerlerine göre daha yüksek olması ve jeotermal ısı kaynaklarına olan ilgisizliktir.

Seçilen herhangi bir sistemdeki boru uzunluğu aşağıdaki etkenlere bağlı olarak değişmektedir.

• Sistemin soğutma kapasitesi

• Soğutma için COP değeri

• Yıllık ortalama toprak sıcaklığı

• Toprak direnci

• Boru direnci

• Isı değiştiricisi tipi

• Soğutma için çalışma faktörü

4.3 Toprak Isı Değiştiricisi Tasarımı

Ortalama yıllık toprak sıcaklığının, 50 ft (15.24 m)'den 150 ft (45.72 m)'e kadar kuyu derinliğindeki kuyu suyu sıcaklığına eşit olduğu farz edilir. Bu, yaklaşık olarak, ortalama yıllık hava sıcaklığına 2 ºF (1.1 ºC) ekleyerek bulunabilir.İstanbul'da yıllık ortalama dış hava sıcaklığı DMİGM'nin verdiği değerlerden bellidir.Yıllık ortalama toprak sıcaklığı T_{mip} = 13,837 ºC bulunur.

Böylece düşük ve yüksek toprak sıcaklıkları (T_{dip} ve T_{mip}) sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle bulunabilir.

$$T_{dip} = T_{mip} - 5$$
$$T_{yip} = T_{mip} + 5 \qquad \textbf{(4.1)}$$

Toprak ısı değiştiricisinin alt ve üst değerleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$T_{hemin} = T_{dip} - 9.44$$
$$T_{hemax} = \min\left(T_{yip} - 6.7\ ,\ 43.3\right) \qquad \textbf{(4.2)}$$

kW başına düşen ısı değiştiricisinin boyunu bulabilmek için ısıtma mevsimi için eşitlik (4.3) kullanılır. (Kavanaugh ve Rafferty, 1997)

$$L_b = \frac{572.\frac{COP-1}{COP}.R_b + R_t.F_{pl}}{T_{dip} - T_{hemin}} \qquad \textbf{(4.3)}$$

Boru malzemesi : PESCH40 seçilmiştir.

Boru yatay tiptedir ve boru çapı 1 ½" olarak belirlenmiştir. Buna göre Çizelge 4.1'den boru direnci R_b = 0,117 bulunur. Yatay pozisyondaki boru R_p ve dikey pozisyondaki boru ile R_{be} verilmiştir. Burada belirtilen değerler hfeetF/BTU cinsindendir ve 1,73'e bölünerek mK/W'a dönüştürülebilir (Miles, 1994).

Çizelge 4.1 : Boru direnci (Miles, 1994)

R_b (yatay) / R_{be} (düşey)				
Boru çapı	PESCH- 40	PESDR- 11	PESDR- 17	PESDR- 13.5
¾”	0.17 / 0.116			
1”	0.159 / 0.109			
1 ¼”	1.130 / 0.089	0.144 / 0.096	0.16 / 0.11	0.20 / 0.14
1 ½”	0.117 / 0.080			
2”	0.098 / 0.068			

Toprak direnci ise Çizelge 4.2’ de verilmiş olan çizelgeden 1 m derinlik için enterpolasyonla 1 ½” boru için R_t = 0,903 bulunur. Toprağın nemli olduğu kabulü yapılmıştır. Burada belirtilen değerler de yukarıdaki gibi hfeetF/BTU cinsindendir ve 1,73’e bölünerek mK/W’a dönüştürülebilir (Miles, 1994).

Çizelge 4.2 : Toprak direnci (Miles, 1994)

		Rt (AĞIR TOPRAK-NEMLİ) / Rt (AĞIR TOPRAK-KURU VEYA HAFİF TOPRAK-NEMLİ)										Rt (KAYA) / Rt (AT-NEMLİ)
		3	4	5	6	3 5	4 6	3 4 5 6	4 5 6 7	3 1 4 2	3 1 4 2	
BORU ÖLÇÜSÜ	3/4	1,02 1,38	1,06 1,44	1,09 1,47	1,11 1,49	1,31 1,77	1,37 1,84	2,05 2,75	2,15 2,86	2,11 2,85	1,88 2,53	0,6 1,06
	1	0,97 1,32	1,02 1,37	1,04 1,4	1,06 1,42	1,26 1,7	1,32 1,77	2 2,88	2,1 2,79	2,07 2,78	1,84 2,47	0,57 1,01
	1_1/4	0,92 1,25	0,97 1,31	0,99 1,34	1,01 1,36	1,22 1,63	1,27 1,7	1,96 2,61	2,05 2,72	2,02 2,71	1,79 2,4	0,54 0,96
	1_1/2	0,89 1,21	0,94 1,27	0,97 1,3	0,98 1,32	1,19 1,59	1,25 1,66	1,92 2,57	2,02 2,68	1,99 2,67	1,76 2,36	0,53 0,94
	2	0,85 1,15	0,89 1,2	0,92 1,24	0,94 1,26	1,14 1,53	1,2 1,6	1,88 2,51	1,98 2,62	1,94 2,61	1,71 2,29	0,5 0,89

İşletme faktörü ısı kaybının ve kazancının en yüksek olduğu aylarda, cihazın bu yükleri karşılaması için gereken çalışma zamanına işletme faktörü denir ve F_{pl} ile gösterilir.İşletme faktörü eşitlik (4.4) ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{pl} = \frac{\text{Ortalama ısı kaybı}}{\text{Cihazın kapasitesi}} \qquad \textbf{(4.4)}$$

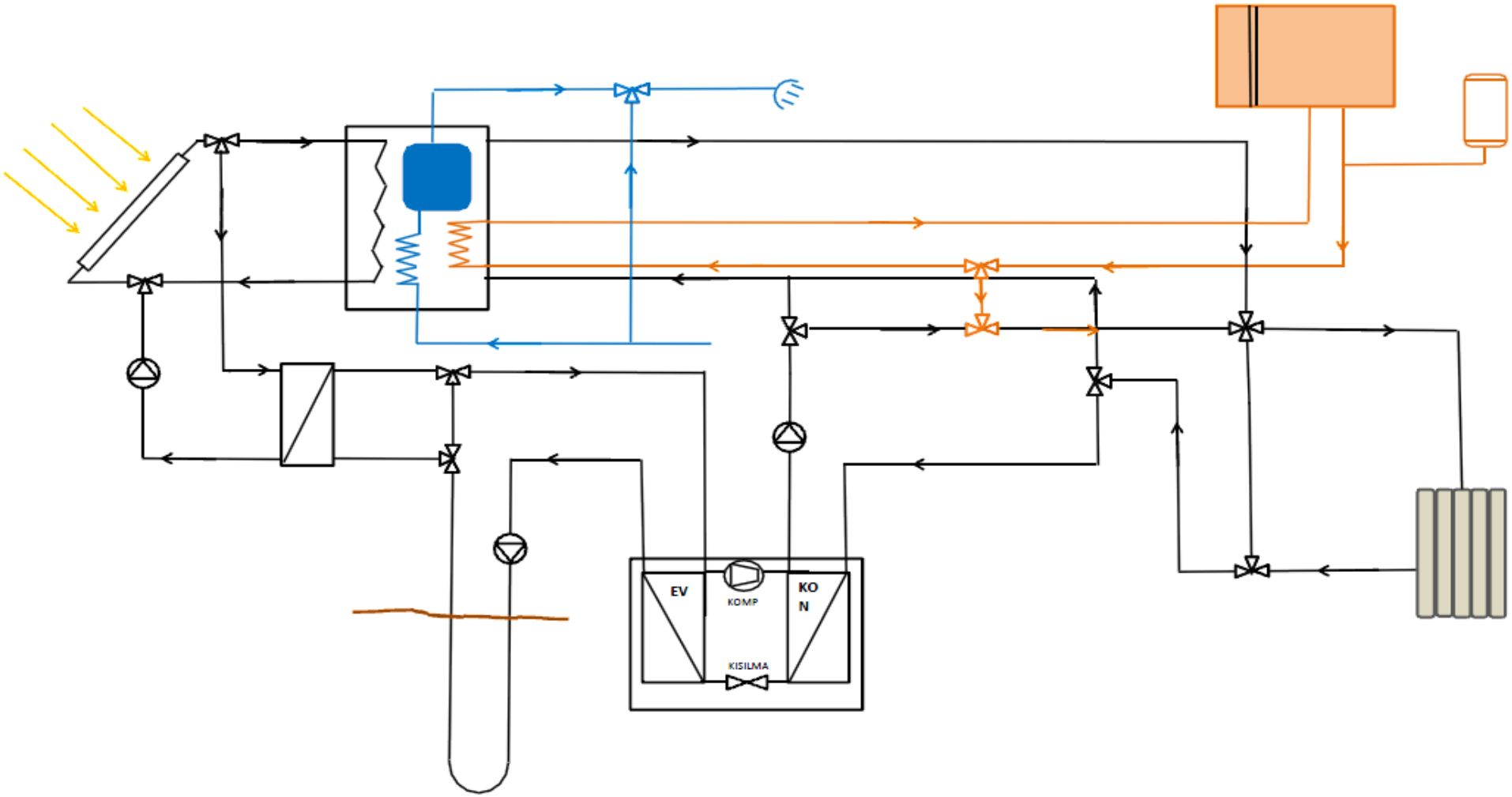
Böylece toprak ısı değiştiricisi için gereken kW başına boru boyu uzunluğu vulunmuş olur. Toplam boru uzunluğunu bulabilmek için ise eşitlik (4.5)'den yararlanılır.

$$L_{btop} = \max\left(Q_{yük}\right).L_b \qquad \textbf{(4.5)}$$

5. SİSTEM MODELLEME

Bu çalışmada İstanbul'da bulunan basit bir müstakil ev için saatlik ısıtma ve kullanma sıcak suyu net enerji ihtiyaçları hesaplanarak sistem tasarımı yapılmıştır. Bu sistem güneş enerjisi sistemi, ısı pompası ve kazan gibi sistemlerden oluşan kombine bir sistemdir. Bir yıl boyunca saatlik olarak MATLAB programında simulasyon yapılarak sistem modellenmiştir. Modellenen sistemin MATLAB programlama kodu Ek A'da sunulmuştur. Sistemin modeli Şekil 5.1'de görülmektedir.

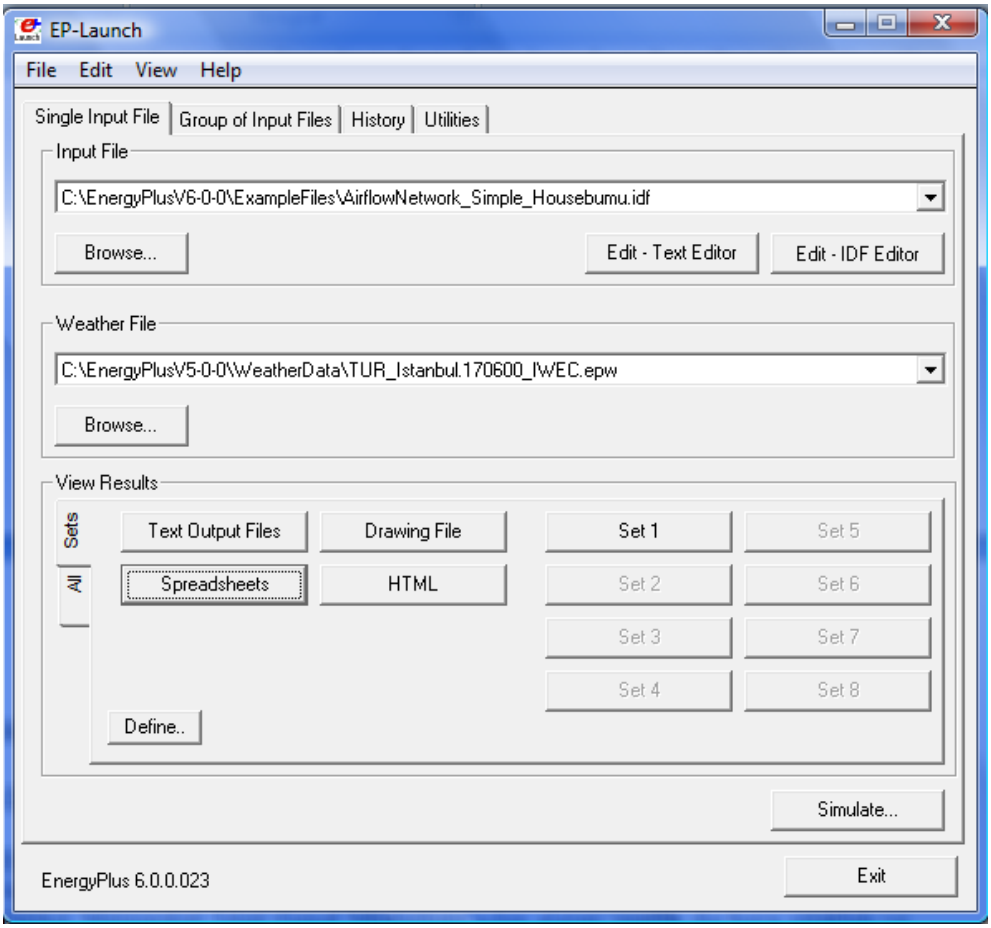
Şekilde otomasyon ve kontrol panoları gözükmese de üç yollu motorlu vanalar gösterilmiştir ve sistemde depo sıcaklığına bağlı olarak kontrol yapılmaktadır. Öncelikli sistem güneş enerjili sistemdir. Güneş enerjili sistemin yeterli olmadığı durumda ısı pompası veya kazan devreye girecektir. Isı pompası depo sıcaklığına veya güneş enerjisinin mevcudiyetine göre belli kapasitelerde çalışacaktır. Ayrıca ısı pompası toprak kaynaklı olarak seçilmiştir ve depoya yerleştirilen evaporatörüyle de gerektiğinde depodan yani güneş enerjisinden beslenerek ısıl verimini arttırabilecektir. Sistem 50/40°C rejiminde çalışmaktadır, ancak depo sıcaklığı güneş enerjisi veya kazanın etkisiyle 45°C'nin üzerine çıktığında veya sistemden dönüş suyu bu değeri aştığında ısı pompası by-pass edilerek güvenliği sağlanacaktır. Sistemlerin çalışma modları senaryolarla değiştirilebilir. Kazan ve ısı pompasının farklı şartlara ve kontrollere göre ısıları depoya veya direk sisteme yönlendirilebilir.



Şekil 5.1 : Sistemin modeli

5.1 Bina Isıl Yükleri Hesabı

Bina net enerji ihtiyacı hesabı için Energyplus programı kullanılmıştır. Energyplus programı Birleşik Devletler Eneji Departmanı'nın resmi programıdır ve internet üzerinden ücretsiz indirilebilir. Aşağıdaki Şekil 5.2'de program arayüzünden bir görüntü görülebilir.

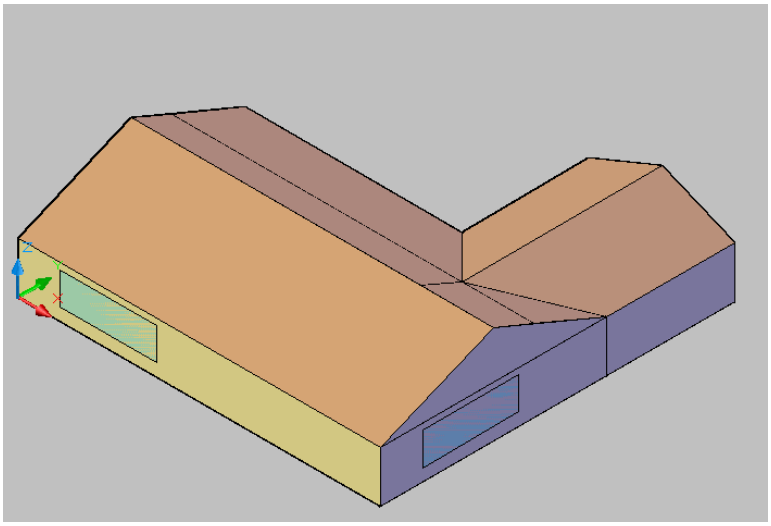


Şekil 5.2 : Energyplus programı arayüzü

Energyplus bir enerji analiz ve ısıl yük hesaplama programıdır. Kullanıcının tanımladığı binayı fiziksel performansı, ısıl yükler, mekanik sistemler, aydınlatma vb. gibi birçok yönden analiz ederek istenen ısıl kontrol ayar noktaları, yükler, birincil ve ikincil donanımlar ile ilgili simulasyonlar gerçekleştirir.

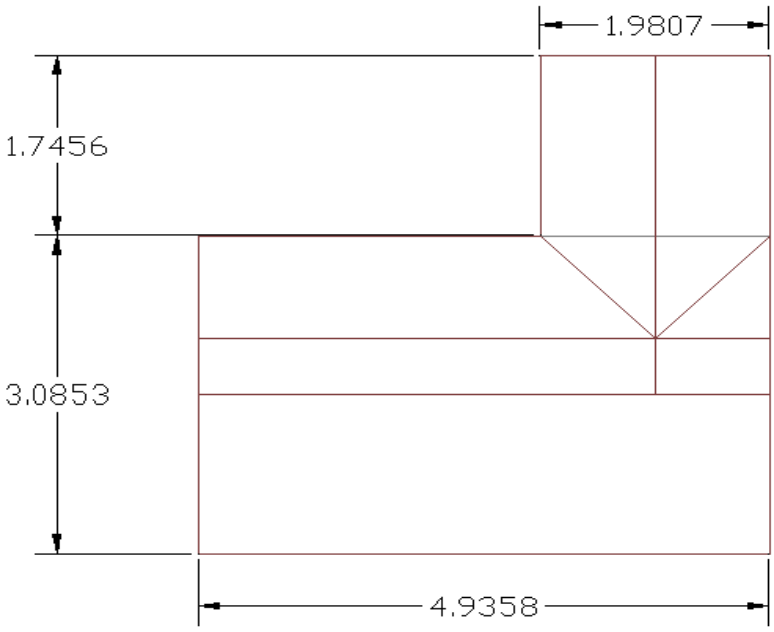
Sistemimizde tanımlanan bina İstanbul'da, Energyplus'ın örnek müstakil evlerinden biridir. Energyplus dünyada birçok şehre ait verileri ASHRAE'nin dış hava sıcaklık verilerinden almaktadır (2009).

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi Autocad veya başka bir çizim programında üç boyutlu olarak veya Şekil 5.4'teki gibi üstten görünüşlü gibi seçeneklerle ve detaylarıyla bina çizimi alınabilmektedir.



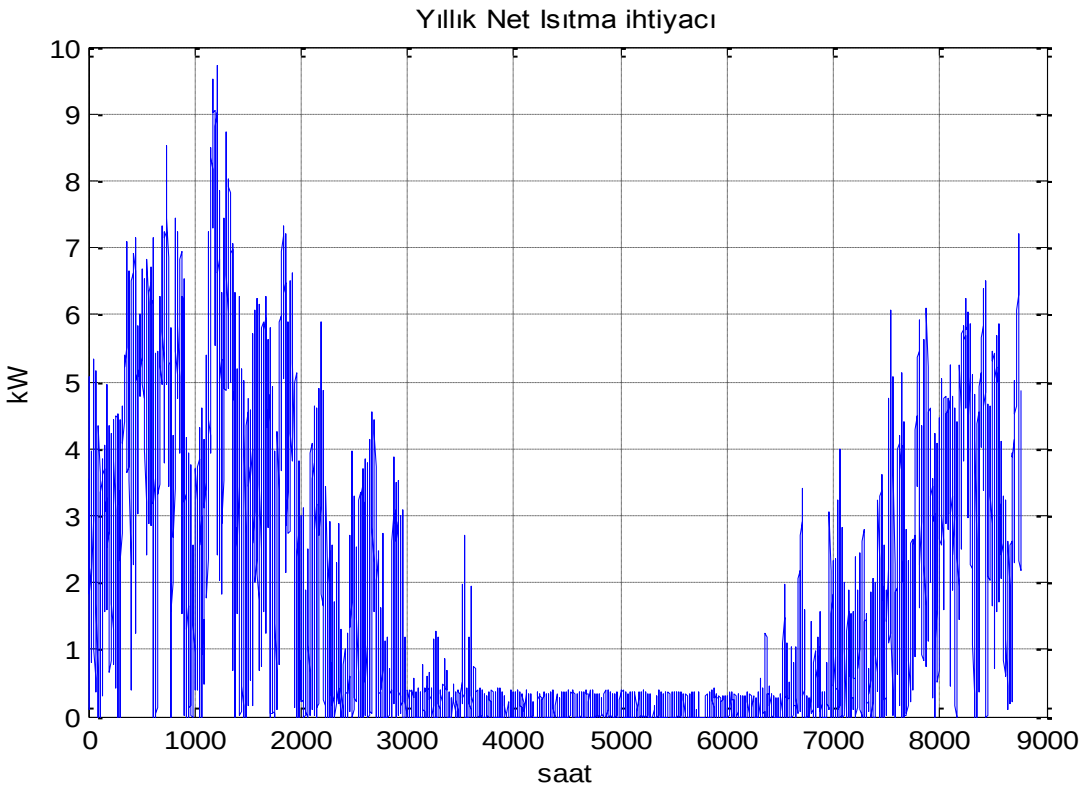
Şekil 5.3 : Binanın 3 boyutlu çizimi

Konu edilen bina 456 m^2 toplam alana, 185,83 m^2 iklimlendirilen alana sahip 3 zonlu bir yapıdır. Bu zonlar kullanılan zon, çatı arası ve garaj zonlarından oluşmaktadır ve yalnızca kullanılan iklimlendirilmektedir.



Şekil 5.4 : Binanın üstten görünüş kesiti

Şekil 5.5'te ise MATLAB programına aktarılıp çıktı alınan saatlik ısıtma net enerji ihtiyaçlarının yıllık dağılımı görülmektedir. Ek B'de bina ısı ihtiyacı sonuçları verilmiştir.

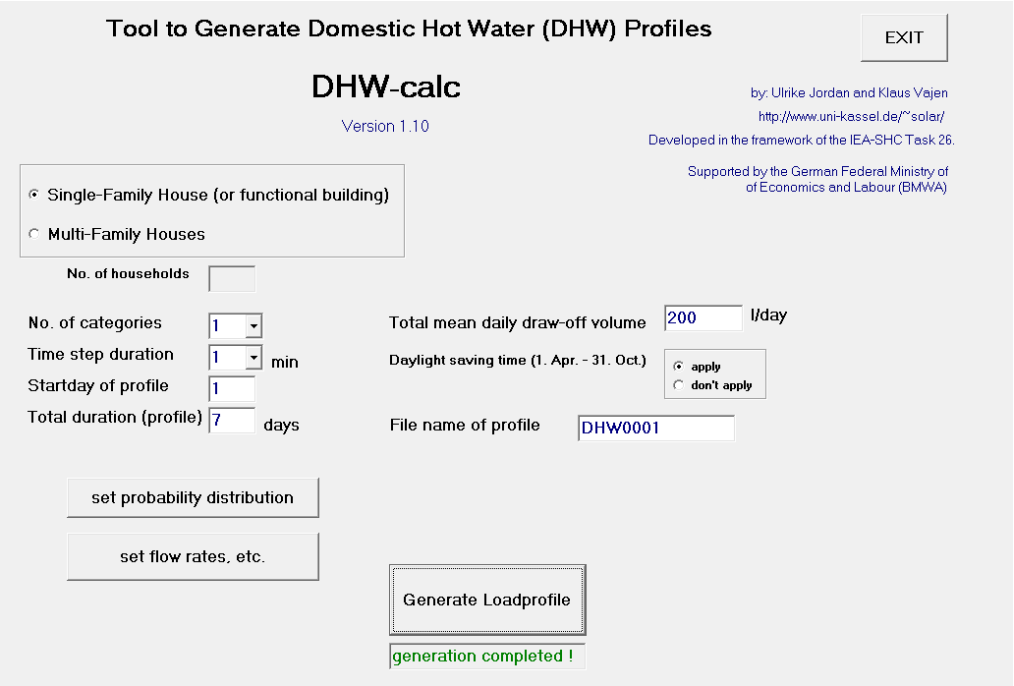


Şekil 5.5 : Yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı

5.2 Kullanma Sıcak Suyu Yükleri Hesabı

Kullanma sıcak suyu yükleri hesabı saatlik olarak elde edilmek istendiğinden DHW-calc adında Kassel Üniversitesinde (Almanya) hazırlanan bir program yoluyla hesaplanmıştır.

Buna göre günlük profiller saatlik olarak belirlenir ve her güne uygulanır. Sistemimizde günlük 200 litre ihtiyaç olduğu girilir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi program arayüzüne debiler, günlük sıcak su ihtiyacı girilerek hesap yapması sağlanır.



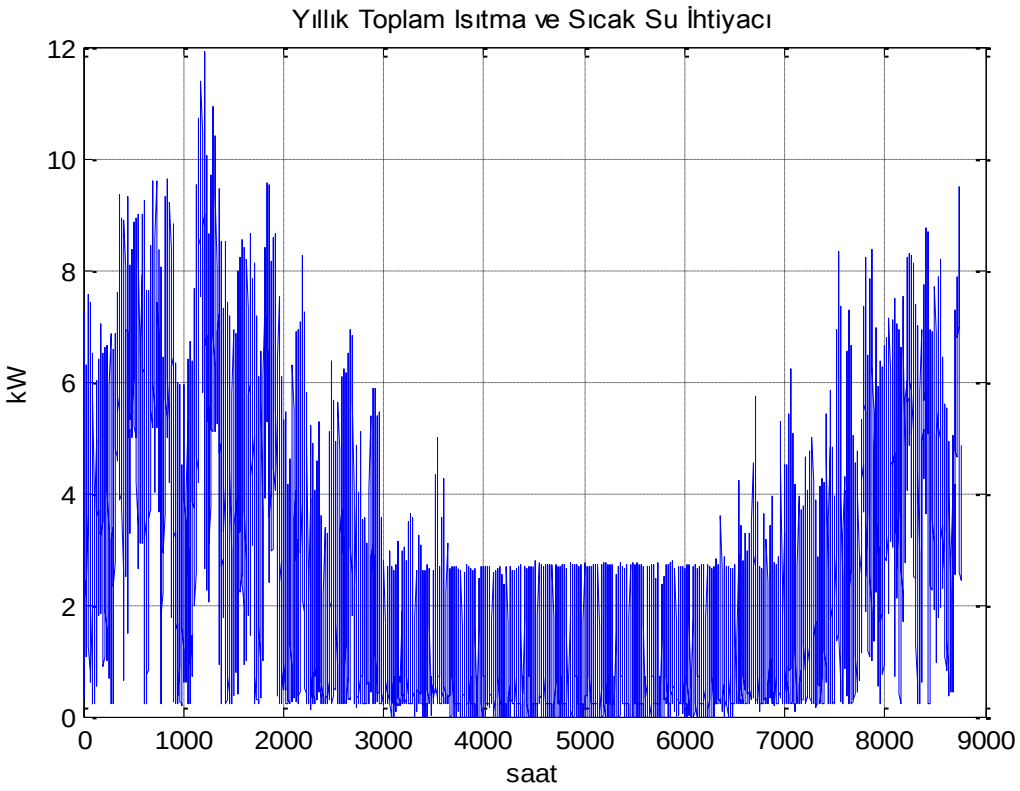
Şekil 5.6 : DHW-calc programı arayüzü

Program dışında hesaplanmak istenirse W cinsinden hesabı debi biliniyorsa aşağıda verilen (5.1)eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$T_{sebeke} = 13\,°C$ ve $T_y = 50°C$ olmak üzere,

$$Q_{kss} = \frac{\left(\dot{m}_{su}.c_{p_{su}}.\left(T_y - T_{şebeke}\right)\right)}{3.6} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Tüm bunların sonucu olarak ısıtma ve sıcak kullanma suyu saatlik ihtiyaçları Şekil 5.7'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 5.7 : Yıllık toplam ısıtma ve sıcak su ihtiyacı

5.3 Güneş Enerjili Aktif Isıtma Sistemi

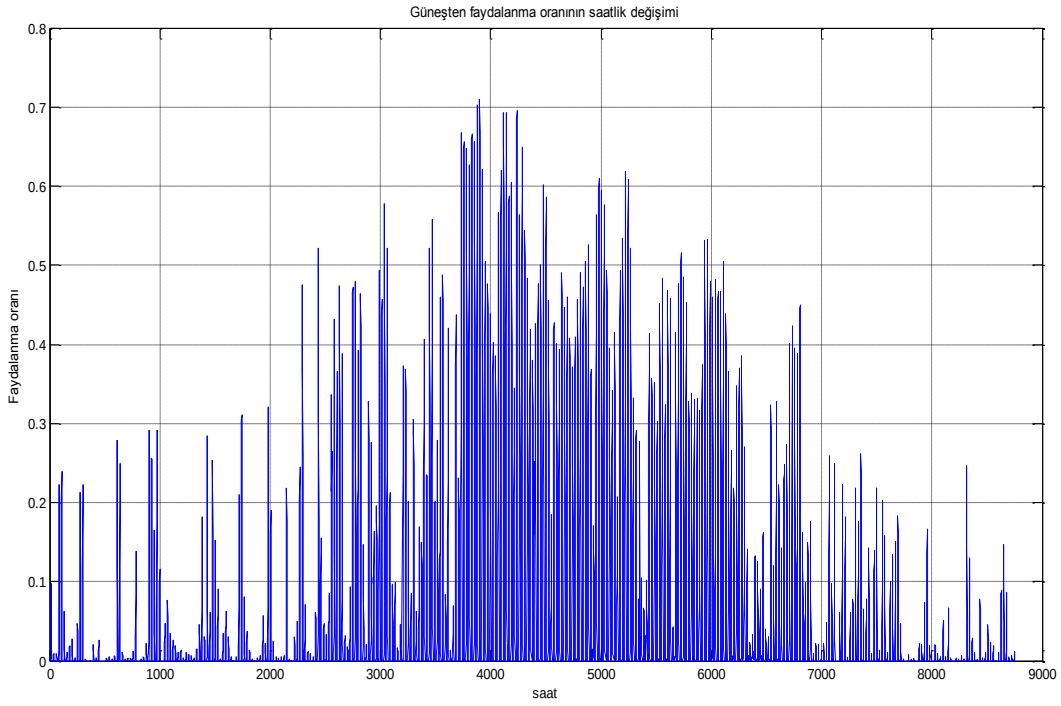
Güneş enerjisi sisteminde düz kolektör, karıştırılmış depo ve ısı değiştiricisi ile pompa kullanılmıştır.

Kolektör alanı ve depo hacmi, hazırlanan MATLAB programıyla parametrik olarak değiştirilip diğer sonuçlar elde edilebilir. Dikkat edilmesi gereken, kolektör alanı ve depo hacmini uyumlu seçmektir; böylece hem sistemin zarar görmesi önlenir, hem de enerji daha verimli kullanılır.

Çizelge 5.1 : Kolektör alanı seçimi

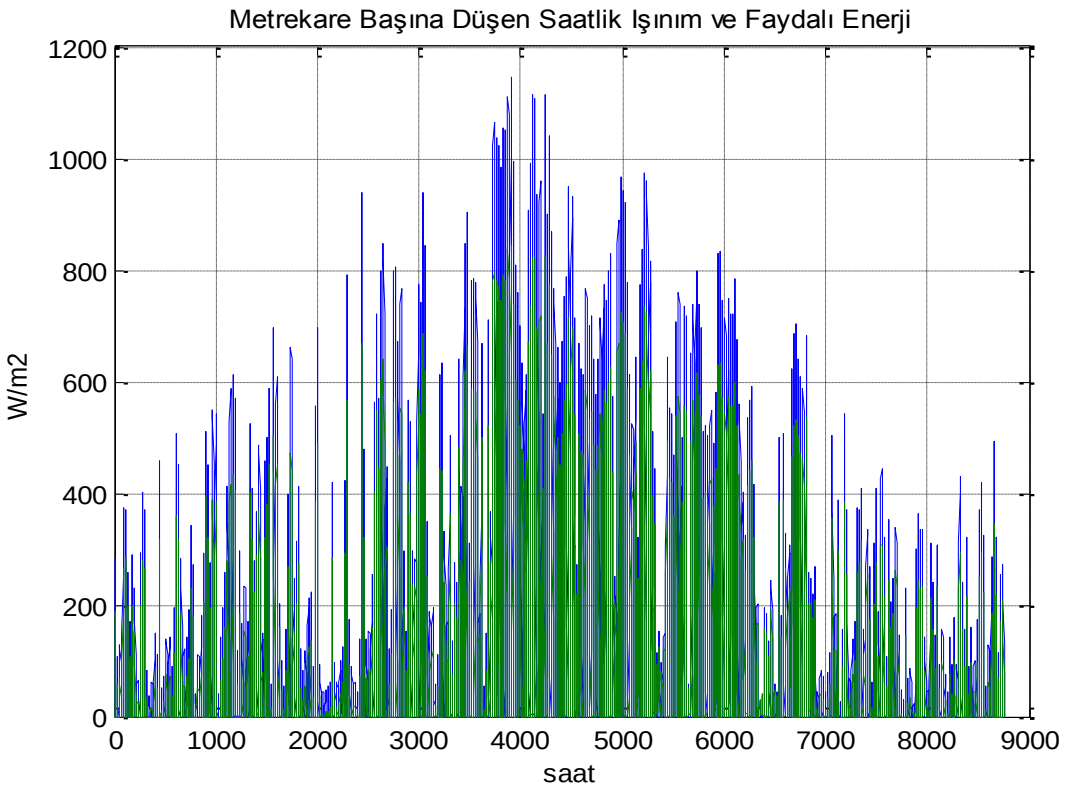
$A_c(m^2)$	Q_u (W)	Kolektör Fiyat (TL)	f	f / TL
10	8828	3250	0,03	9,23E-06
20	16428	6500	0,0598	9,20E-06
30	22291	9750	0,0786	8,06E-06
40	25970	13000	0,0877	6,75E-06
50	28234	16250	0,0891	5,48E-06

Bina özellikleri, kolektör özellikleri ve meteorolojik veriler girilerek optimum kolektör boyutuna ulaşmak mümkündür. Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi ortalama faydalanma oranı en yüksek olan kolektör alanı 10 m^2 olandır, ancak binanın ısıtma ihtiyacı için yeterli olmadığından 20 m^2 kolektör alanı seçilmiştir. Faydalanma oranı ve kolektör alanı göz önüne alındığında da değeri en yüksek olana çok yakındır.



Şekil 5.8 : Güneşten faydalanma oranının saatlik değişimi

Eğik düzleme gelen ışınım ve kolektörün ürettiği metrekare başına düşen faydalı enerji değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.9'da saatlik olarak verilmiştir. Yeşil ile gösterilen kısım faydalı enerjidir. Buna göre kolektör, ışınımın bir kısmını toplayıp sisteme aktarabilmektedir.



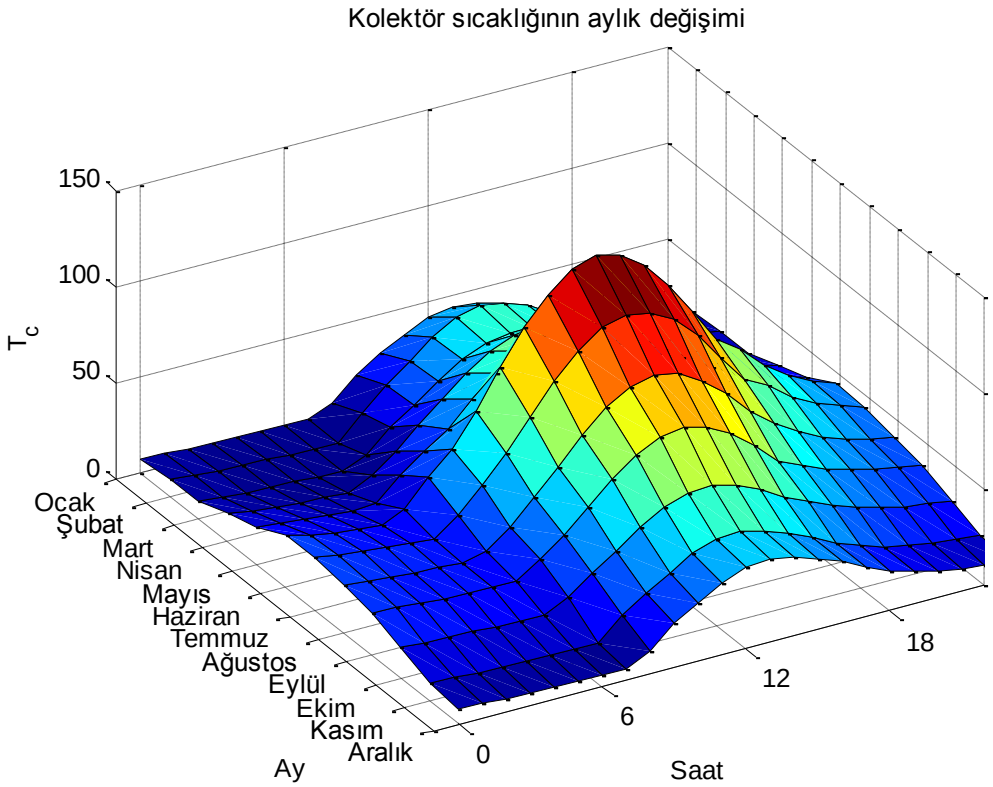
Şekil 5.9 : Metrekare başına düşen saatlik ışınım ve faydalı enerji

Kolektör ve depo sıcaklıkları arasındaki ilişkiler çeşitli diferansiyel denklemlerle edilmiştir. Kolektör sıcaklığı aşağıdaki eşitliklerle pompanın kapalı veya açık olması durumuna göre aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$\frac{dT_c}{dt} = A_c \cdot \frac{(\tau . \alpha . I_e) - U_L . (T_c - T_a)}{\frac{m . (c_p + c_{po})}{A_c}}$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{Q_u - (m.cp) . (T_c - T_{cp})}{\frac{m . (c_p + c_{po})}{A_c}} \qquad \textbf{(5.2)}$$

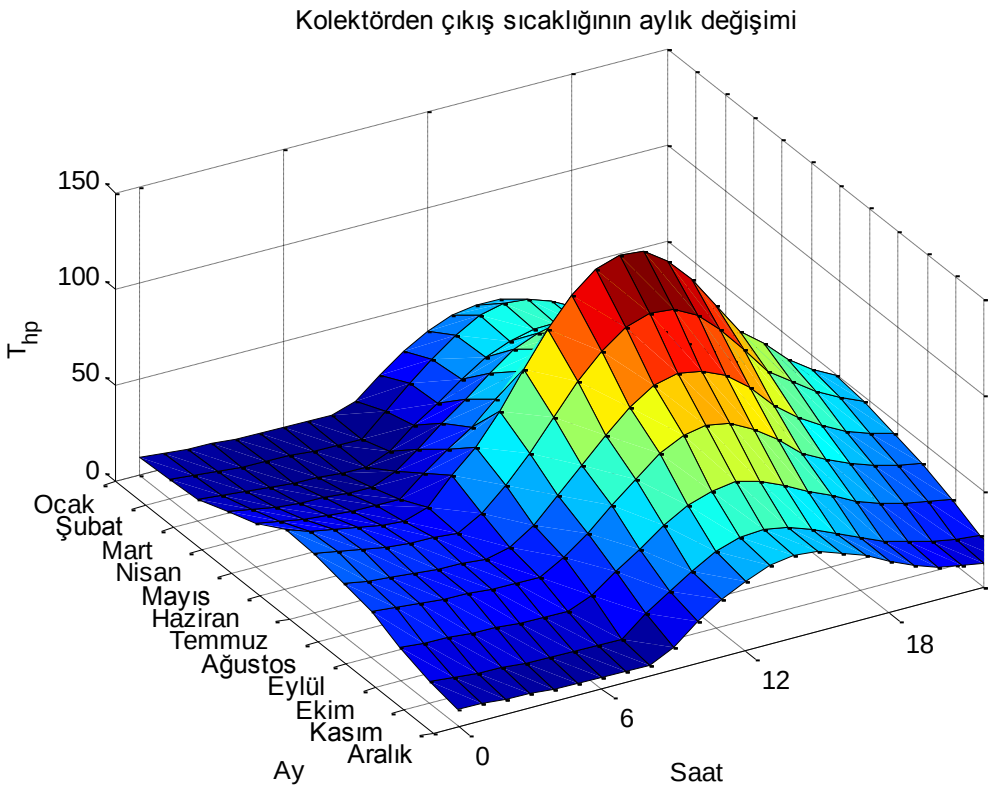
Kolektör içindeki suyun sıcaklığının değişim grafiği Şekil 5.10 ile verilmiştir.



Şekil 5.10 : Kolektördeki suyun sıcaklığının ortalama aylık değişimi

Kolektörden çıkan sıcak su sıcaklığı ise aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu sıcaklık belirlenirken akışkanın geçtiği sıcak boru ısı geçişi de ele alınır.

$$\frac{dT_{hp}}{dt} = \frac{(m.cp).(T_c - T_{hp}) - (U_{hp}A_{hp}).(T_{hp} - T_a)}{\frac{m.(c_p + c_{po})}{A_c}} \qquad \textbf{(5.3)}$$



Şekil 5.11 : Kolektörden çıkan sıcak suyun sıcaklığının aylık ortalama yıllıkdeğişimi

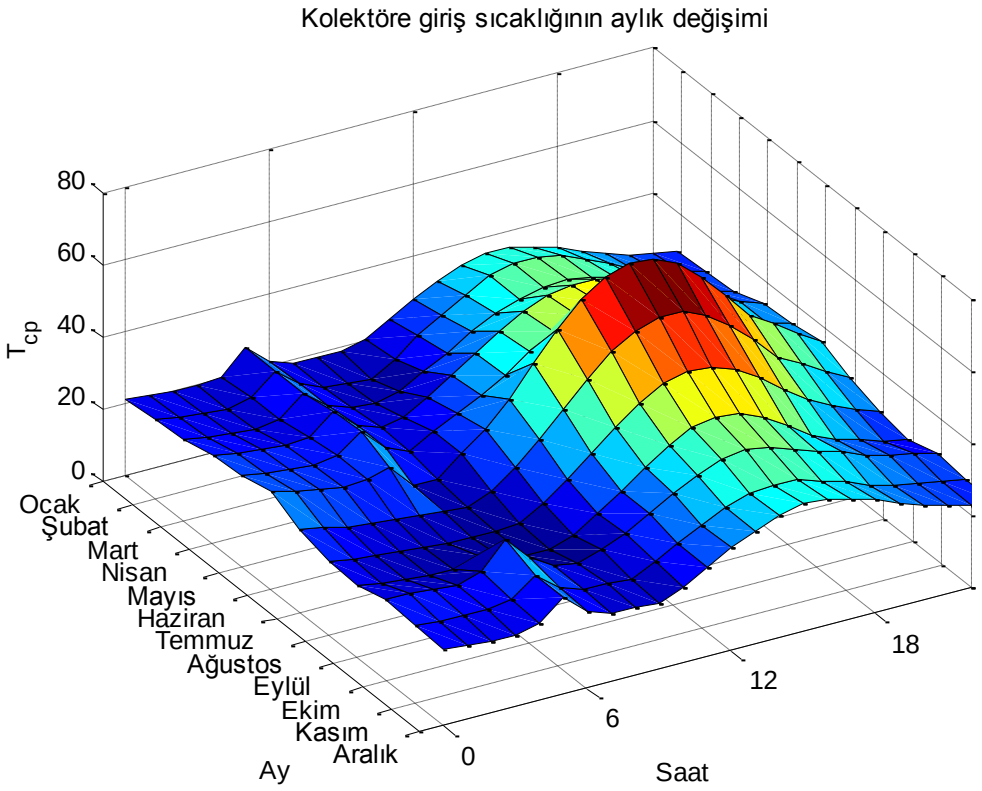
Depolama tankından çıkan suyun sıcaklığı eşitlik (5.4) ile belirlenir. Daha önce hesabı yapılan tank içine daldırılmış ısı değiştiricisinden geçen akışkan tekrar kolektöre döner.

$$T_{se} = T_{hp} + \frac{2.\left(\varepsilon.\left(m.c_p\right)_{min}.\left(T_e - T_{hp}\right)\right)}{\left(m.c_p\right)} \qquad \textbf{(5.4)}$$

Kolektöre giriş suyu sıcaklığı ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır. Bu sıcaklık belirlenirken akışkanın geçtiği borudaki ısı geçişi de ele alınır. (Ünsal ve Söylemez,1989)

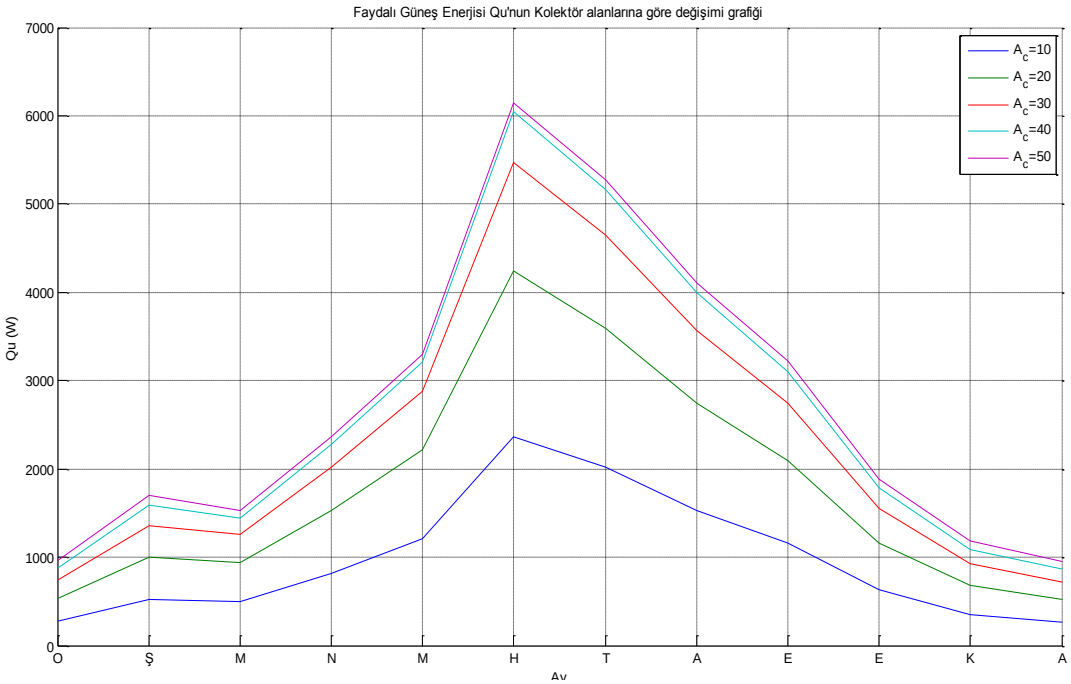
$$\frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{\left(m.c_p\right).\left(T_{se} - T_{cp}\right) - \left(U_{cp}A_{cp}\right).\left(T_{cp} - T_a\right)}{\frac{m\,.\,\left(c_p + c_{po}\right)}{A_c}} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Kolektör giriş sıcaklığının yıllık değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



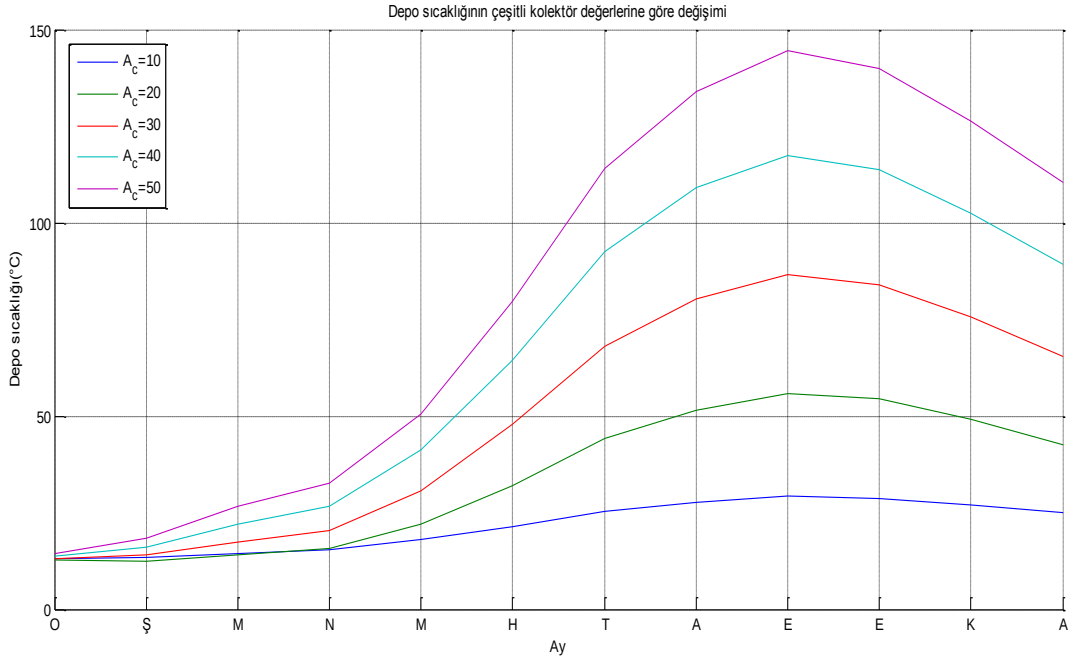
Şekil 5.12 : Kolektöre giren suyun sıcaklığının aylık ortalama yıllık değişimi

Çeşitli kolektör değişimlerine göre güneşten elde edilen faydalı ısının ve depo sıcaklığının grafiği aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Aylara göre kolektör alanına bağlı olarak güneşten gelen faydalı ısının değişimi

Şekil 5.13'e göre faydalı güneş enerjisi kolektör alanıyla artmakla beraber, daha yüksek kolektör alanlarına çıkıldıkça faydalı enerji azalarak artış göstermektedir.



Şekil 5.14 : Depo sıcaklığının çeşitli kolektör değerlerine göre değişimi

Depo sıcaklığı ise, depo hacmi sabit kalmak suretiyle kolektör alanının artmasıyla artış göstermektedir. Hatta 40 ve 50 m^2 kolektör alanlarında ağustos-eylül aylarında 100°C ve üzeri değerlere ulaşabilmektedir. Bu kolektör alanları seçiminde, depo hacmi daha büyük seçilmeli veya vanalarla çeşitli önlemler alınarak sistemin yapısının bozulması önlenmelidir.

5.4 Isı Pompası Sistemi

Isı pompası sistemi toprak kaynaklı ısı pompası seçilmiştir ve toprak ısı değiştiricisi tasarımı yapılmıştır.Buna göre toprak ısı değiştiricisi boru uzunluğu L_{btop} = 213.4232 m bulunmuştur.

Soğutucu akışkan olarak sistemde R134a kullanılmıştır. Evaporatör giriş sıcaklıklarına göre termodinamik tablolardan entalpi ve entropi değerleri belirlenmiştir.

Toprak kaynaklı ısı pompası için İstanbul şartları için evaporatör giriş sıcaklığı 4,397°C belirlenmiştir ve doyma basıncı P_1 = 342.73 kPa olarak hesaplanmıştır. Kızgın buhar tablosundan kondenser giriş sıcaklığı için P_2 = 1,6 MPa olarak belirlenip hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

Entalpi değerleri;

$$h_1 = 419{,}68 \text{ kj/kg}$$
$$h_2 = 469{,}95 \text{ kj/kg}$$
$$h_3 = 276{,}22 \text{ kj/kg} \quad \textbf{(5.6)}$$

ve sıcaklık değerleri;

$T_1 = 4{,}397$ °C

$T_2 = 94{,}73$°C

$T_3 = 57{,}88$°C **(5.7)**

olarak bulunmuştur.

5.4.1 Isı pompası elemanları seçimi

Isı pompasında kondenser toplam ısıl yüke eşit olarak alınır.

$$Q_{kondenser} = Q_{tot} \quad \textbf{(5.8)}$$

Sistemdeki debi ise (kg/s) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanarak evaporatör kapasitesi ve kompresör gücünü bulmaya yarar.

$$m_{ip} = \frac{Q_{kondenser}}{h_2 - h_3} \quad \textbf{(5.9)}$$

Evaporatör kapasitesi için (5.10) eşitliği kullanılır.

$$Q_{evaparatör} = m_{ip}.(h_1 - h_3) \quad \textbf{(5.10)}$$

Kompresöre verilen güç ise (5.11)eşitliği ile ifade edilir.

$$Q_{komp} = m_{ip}.(h_2 - h_1) \quad \textbf{(5.11)}$$

Gerçek kompresör gücünü bulabilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır. Burada kompresör verimi %80 kabul edilmiştir.

$$Q_{kompg} = \frac{Q_{komp}}{0.8} \quad \textbf{(5.12)}$$

Performans katsayısı hesabı da entalpi farklarıyla belirlenir.

$$COP = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)} \quad \textbf{(5.13)}$$

Bunlar sonucunda ısı pompası seçimi aşağıdaki değerlere göre yapılır.

$Q_{evaporatör}$ = 8,8304 kW

$Q_{kondenser}$ = 11,9247 kW

Q_{komp} = 3,0943kW

Q_{kompg} = 3,1996 kW

COP = 4,6587

COPg=3,8679 **(5.14)**

Güneş enerjisi destekli olması durumunda ise,

$$Q_{kondenser} = Q_{tot} - Q_u \quad \textbf{(5.15)}$$

eşitliğinden yararlanarak sonuçlar elde edilir. Bu sistemin sonuçları ileriki kısımlarda ele alınmıştır.

5.5 Kazan seçimi

Kazan seçimi yıllık ısıtma ihtiyacına göre yapılır. Kazan kapasitesi yılın en soğuk günü baz alınarak belirlenir. Ele alınan yapının yıllık 14.081,72208 kWh ısıtma enerjisi bulunmaktadır ve 9,7095 kW ısıtma yüküne sahiptir.

Buna göre tek başına kazan kullanılması durumunda kazanın %80 verimle çalıştığı varsayılırsa minimum 12,1369 kW'lık ısıtma kapasitesine sahip kazan kullanılması gerekir.

5.6 Çalışma Senaryolarına Göre Sistem Seçimleri

Kombine ısıtma sistemlerinin çalışma şekilleri çeşitli senaryolara göre belirlenmiştir. Buna göre 6 adet çalışma şekli ortaya çıkmıştır ve bunların birbirleriyle kıyaslamaları yapılmıştır.Bunlar;

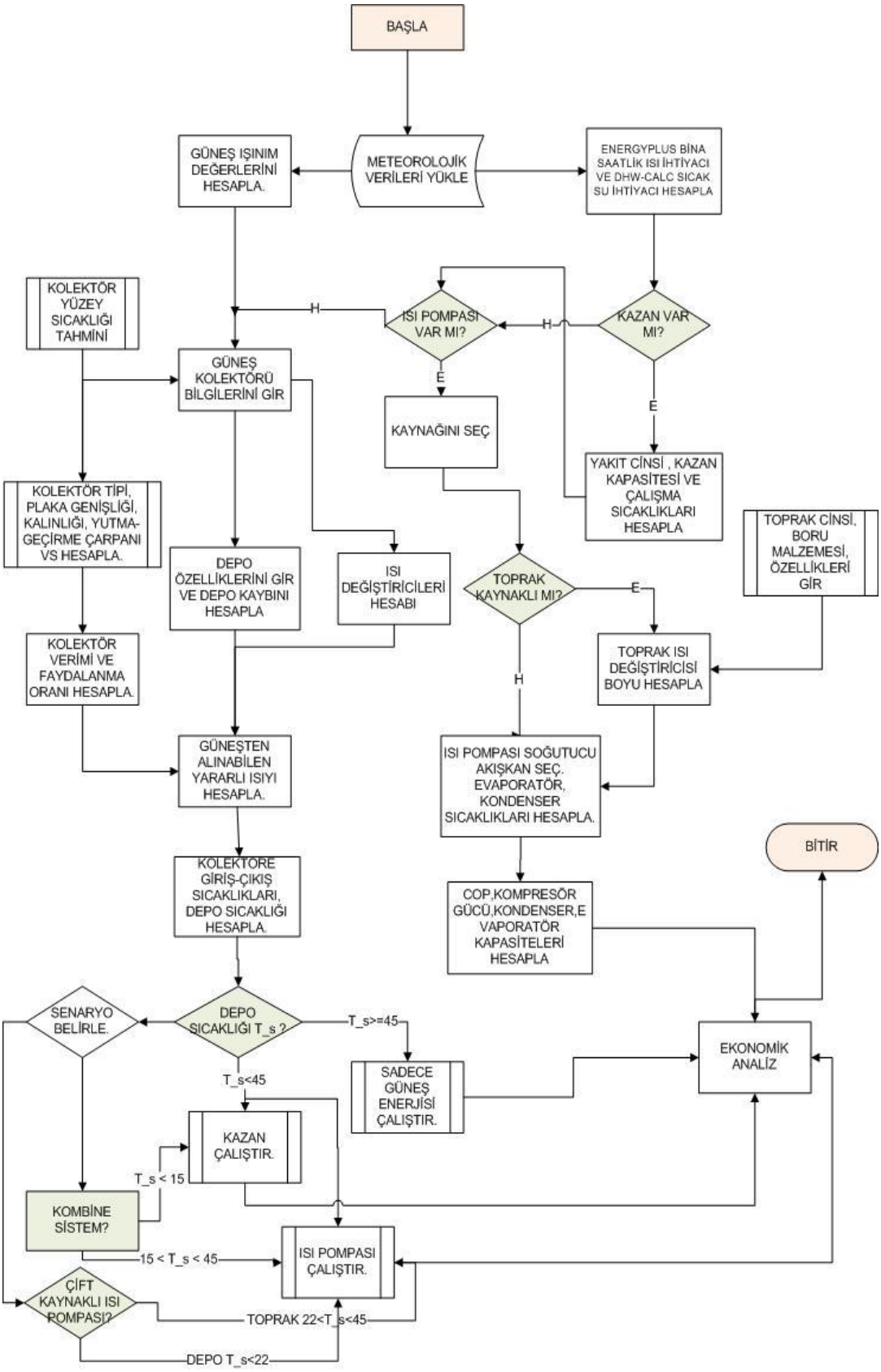
- Kazan (Kombi)
- Güneş enerjisi + Kazan(Kombi)
- Isı pompası
- Güneş enerjisi + Isı pompası
- Güneş enerjisi + Çift kaynaklı ısı pompası(Dual source)
- Güneş enerjisi + Isı pompası + Kazan (Kombine sistem)

Sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 5.15'de akış şemasıyla gösterim yapılmıştır.

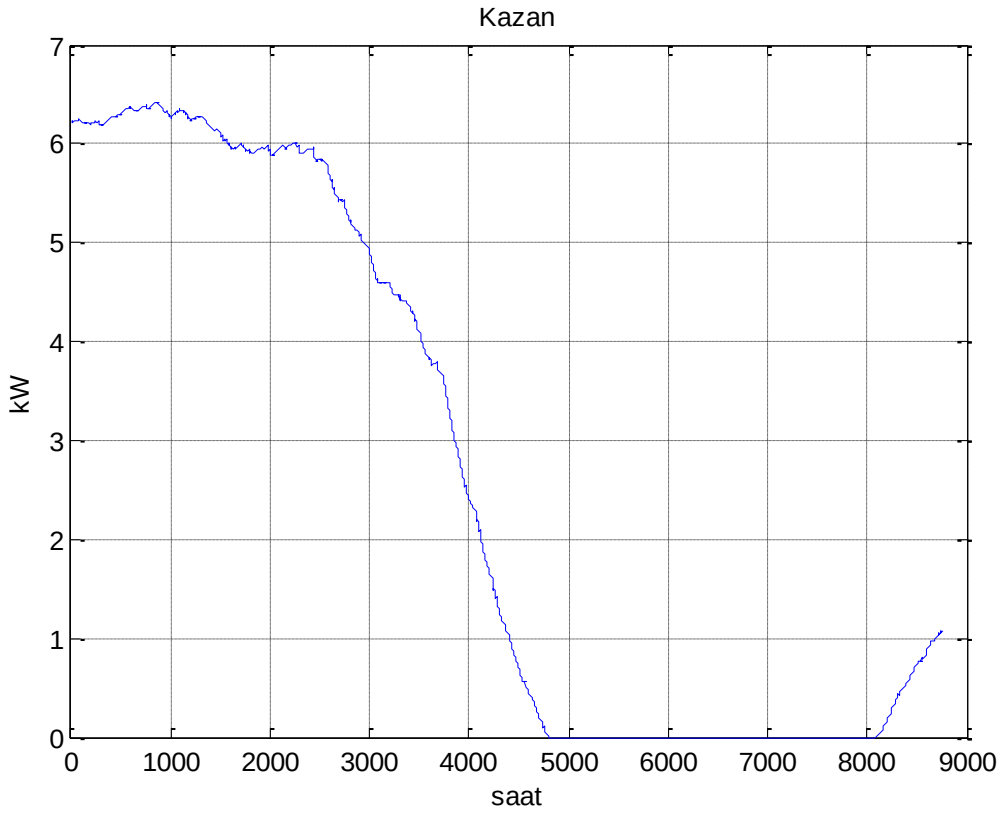
Yukarıda anlatılan durumlar ısı pompası ve kazanın tek başına çalışma durumlarında oluşmaktadır. Diğer maddeler ve çalışma senaryoları aşağıda açıklanmıştır.

5.6.1 Güneş Enerjisi ve Kazan

Güneş enerjisine destek olarak kullanılması durumunda depo sıcaklığı değişimine bağlı olarak hesaplama yapılmıştır. Depo sıcaklığı 45°C'nin altına düştüğünde kazan devreye girecek şekilde tasarım yapılmıştır. Buna göre elde edilen grafik Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : Sistem akış şeması



Şekil 5.16 : Depo sıcaklığına bağlı olarak kazanın yıl boyunca çalışma kapasitesi

Buna göre güneş enerjisi destekli kazan olması durumunda (%80 kazan verimi olması durumunda) 6,4 kW'lık ihtiyaca karşılık 8 kW kazan kapasitesi kullanılabilir.

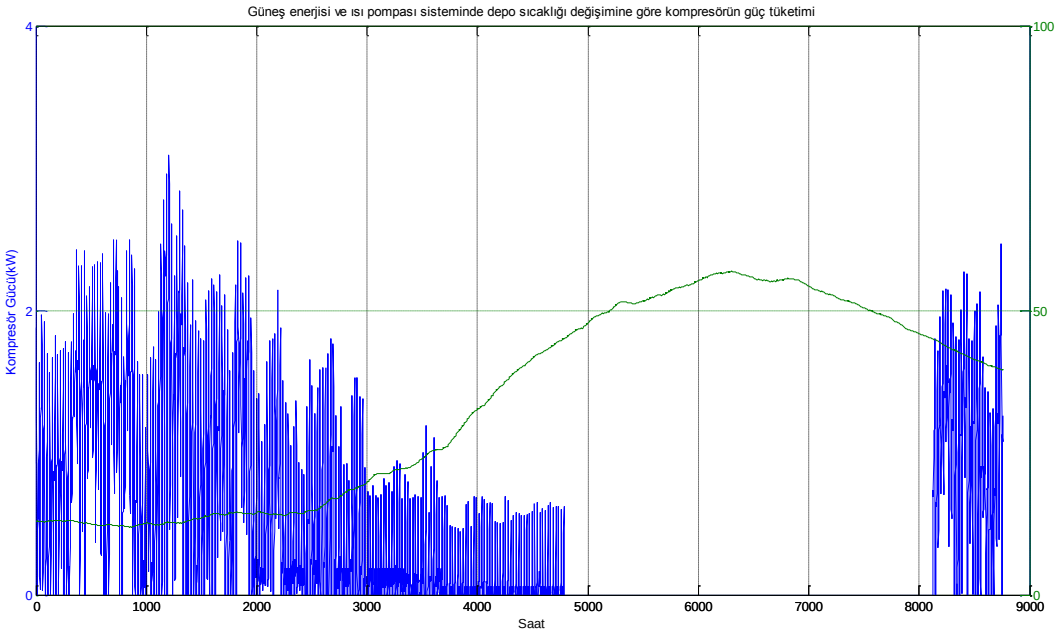
5.6.2 Güneş Enerjisi ve Isı Pompası

Toprak kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin bir arada kullanıldığı durumdur.

Güneş enerjisi depo sıcaklığı 45°C'nin altına düştüğünde ısı pompası devreye alınacaktır.

Bu sistemde yalnızca elektrik tüketilmektedir.

Grafikte görüldüğü gibi 3000. saatten sonra kompresör gücü azalmaktadır, ve elektriğe olan ihtiyaç depo sıcaklığı arttıkça azalmaktadır.



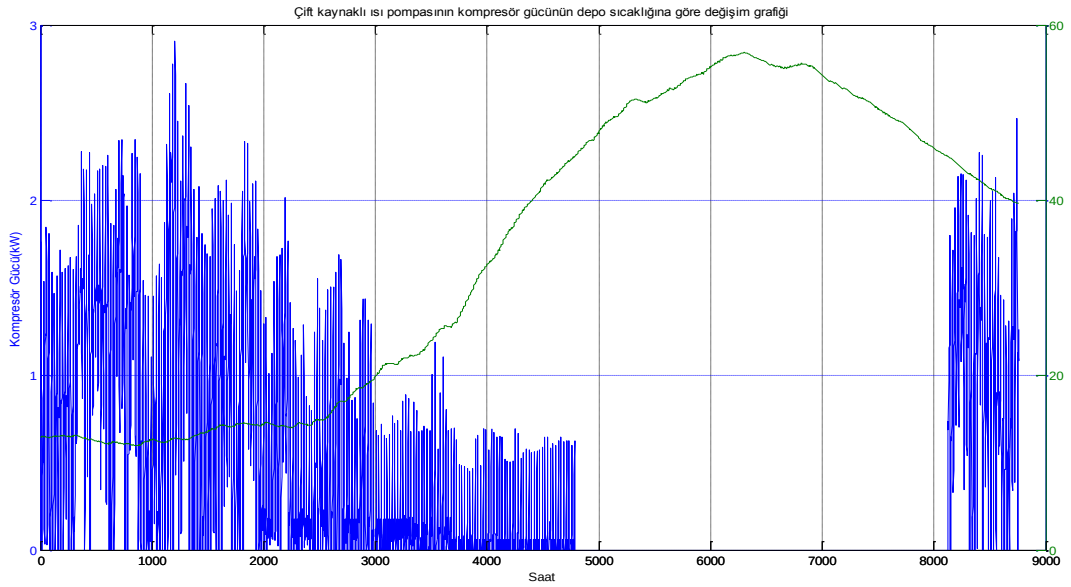
Şekil 5.17 : Toprak kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin bir arada kullanıldığı durum için kompresör güç grafiği

5.6.3 Güneş Enerjisi ve Çift kaynaklı ısı pompası (Dual source)

Güneş enerjisi ve çift kaynaklı ısı pompası sisteminde ısı pompası, iki evaporatörden beslenir. Böylece birinin verimi düştüğünde diğeri devreye alınarak daha verimli bir çalışma sağlanmış olur. Bu sistem için hazırlanan senaryo aşağıdaki gibidir:

- Yalnızca güneş enerjisi devrede : $Ts \geq 45°C$,
- Toprak kaynaklı evaporatör devrede : $22°C < Ts < 45°C$,
- Depo kaynaklı evaporatör devrede : $Ts \leq 22°C$.

Çift kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin kompresörünün çalışma zamanları ve değerleri aşağıdaki grafikte gösterilmektedir. Sadece toprak kaynaklı ısı pompası ile karşılaştırılırsa, yönelimleri ve şekilleri çok benzerlik gösterse de kompresör güçlerindeki farklılıklardan dolayı çift kaynaklı ısı pompası daha verimlidir, COP'si dah yüksek, kompresör gücü daha düşük seçilebilir.



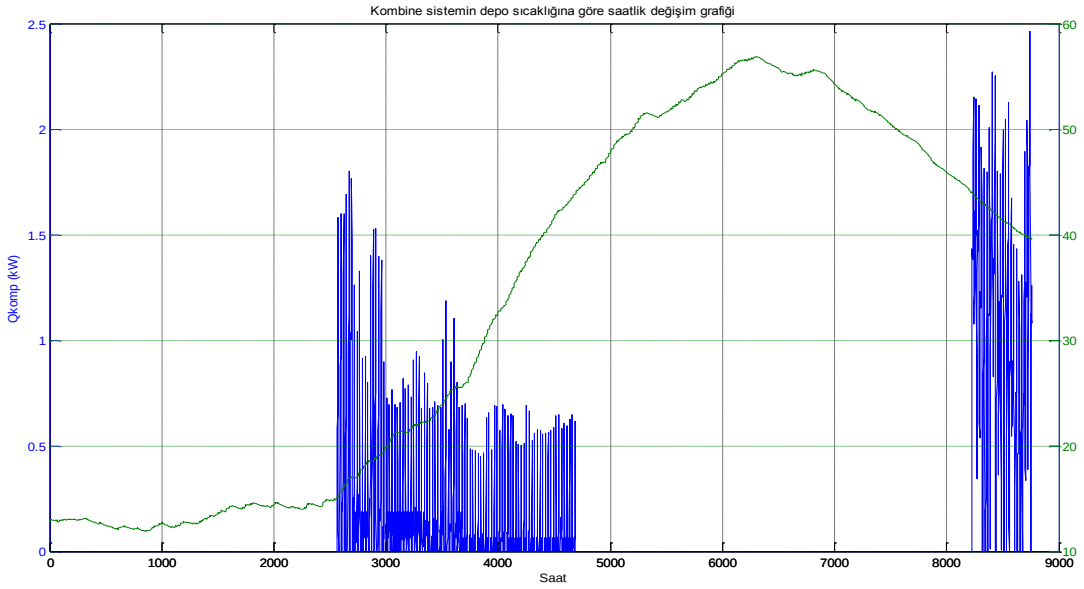
Şekil 5.18 : Çift kaynaklı ısı pompası ve güneş enerjisinin depo sıcaklığına bağlı değişimi

5.6.4 Güneş Enerjisi, Isı pompası + Kazan

Toprak kaynaklı isı pompası , güneş enerjisi: ve kazanın beraber kullanıldığı,birleşik durumdur. Buna göre aşağıdaki belirlenen depo sıcaklıkları değişimine göre devreye girip çıkma zamanları ayarlanmaktadır. Çalışma şekli aşağıdaki düzene göre yapılmaktadır:

- Depo sıcaklığı $Ts \geq 45°C$ iken güneş enerjisi ile ısıtma gerçekleştirilmektedir.
- $15 < Ts < 45°C$ olduğunda toprak kaynaklı ısı pompası çalışmaya başlar.
- $Ts \leq 15°C$'de ise kombi devreye girer.
- Kombine ısı pompası, kazan ve güneş enerjisinin kompresörünün çalışma zamanları ve değerleri aşağıdaki grafikte gösterilmektedir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere, ısı pompasının veriminin düştüğü Ocak, Şubat ve Mart aylarında kombi devrededir ve ısınma kombi ile gerçekleştirilir.



Şekil 5.19 : Kombine kazan, ısı pompası ve güneş enerjisinin depo sıcaklığına bağlı değişimi

5.7 Ekonomik Analiz

Ekonomik analiz, LCC (life cycle cost) yöntemlerinden biri olan Net Bugünkü Değer Yöntemine göre hesaplanmıştır. Net bugünkü değer (NBD) yöntemi , paranın zaman değerini, yani bugünkü ve gelecekteki tüketime ilişkin tercihleri göz önünde bulunduran proje değerlendirme yöntemleridir. Bir projenin net bugünkü değeri, ekonomik ömrü boyunca oluşan net nakit akımlarının önceden belirlenen bir iskonto oranına göre bugünkü değere indirgenmiş değerleri toplamıdır.

Net bugünkü değer, gelirlerin bugünkü değeri ve maliyetlerin bugünkü değerinin farkından hesaplanır. Buna göre önce ilk yatırım maliyetleri ve işletme giderleri belirlenmelidir.

Sistemde kullanılan ekipmanlar tablosu aşağıda gösterilmektedir. Kazanlı sistemde alüminyum radyatörler ve düşük sıcaklıkta çalışan yoğuşmalı kombi kullanılmaktadır.

Modellemesi yapılan güneş enerjisi sisteminde düz güneş kolektörleri kullanılmış olup 20 $m^{2'}$den hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 5.2 : Sistemde kullanılan ekipmanlar

Isıtma sistemi	Aluminyum radyatör (50/40)
Güneş Kollektörü	
Kolektör tipi	Düz güneş kolektörü
Kolektör cam sayısı	Çift camlı
Net kolektör alanı	2,009
Kolektör sayısı	10
Toprak ısı değiştiricisi	
Boru malzemesi	Polietilen
Uzunluk	213,4232 m
Derinlik	1 m
Tip	Yatay serme
Çap	1 1/2"
Isı pompası	
Kompresör	Scroll
Soğutucu akışkan	Freon 134a
Kaynak	Toprak
Kazan	Yoğuşmalı kombi
Yakıt	Doğalgaz
Radyatör uzunluğu	5 m
Depo	880 lt

Bu ekipmanların davranışlarına göre hazırlanan tablo ve ilk yatırım maliyetleriyle kıyaslaması aşağıda gösterilmektedir. Maliyet analizinde konvansiyonel sistemle karşılaştırma yapılıp geri ödeme süreleri ve yıllık karları incelenmiştir. Geri ödeme süreleri en düşük olan sistemler kazan ve güneş enerjili sistemin beraber kullanıldığı sistem ile kazan, ısı pompası ve güneş enerjili sistemin beraber kullanıldığı kombine sistemdir. Ancak net yıllık karı en yüksek olan sistem kombine sistemdir.

Çizelge 5.3 : Ekonomik analiz ve sistem karşılaştırmaları

	Kazan	Kazan+Güneş Enerjisi	Isı pompası	Isı pompası + Güneş Enerjisi	Dual-source Isı pompası + Güneş Enerjisi	Isı pompası + Kazan + Güneş Enerjisi
Sistem	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
n	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
i	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
FPR	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Çalışma Saati	8.389,00	5.459,00	6.225,00	5.459,00	3.747,00	4.054,00
Gerçek Güç (%80)	12,00	8,75	3,87	3,08	3,63	3,00
Yıllık Gider (TL)	7.804,65	3.703,25	5.026,18	3.509,58	2.835,43	1.538,52
İYM (TL)	5.013,82	23.960,37	20.743,13	32.920,36	34.361,28	37.934,18
YİYM (TL)	473,27	2.261,69	1.958,01	3.107,45	3.243,46	3.580,72
Kar (TL)	0,00	4.101,40	2.778,47	4.295,07	4.969,23	6.266,13
Net Yıllık Kar (TL)	0,00	1.839,71	820,46	1.187,62	1.725,76	2.685,42
d	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
GÖS	0,00	5,68	7,11	7,28	6,63	5,87
NBD (TL)	0,00	41.188,60	27.477,14	42.394,61	49.400,60	62.802,80

Güneş enerjili sistemde ilk yatırım maliyetini hesaplamak için;

$C_A = 350$ TL/m^2

$$İYM = C_A.A_c + C_E \quad \textbf{(5.16)}$$

denklemleri kullanılır.Yıllık maliyet analizinde, ilk yatırım maliyetinin ömür ve faiz oranına göre yıllık ilk yatırım maliyeti (YİYM) hesaplanır. Bunun için düzgün serilerle sermayenin yeniden elde edilmesi faktörü (F_{PR}) ile ilk yatırım faktörü çarpılır.

$$F_{PR} = \frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

$$YİYM = İYM \,.\, F_{PR} \quad \textbf{(5.17)}$$

Yıllık gider için,

$$\text{Yıllık Gider} = \frac{\text{Yıllık Çalışma saati. Güç}}{\text{Hu.}\eta}.\text{birimyakıtfiyatı} \quad \textbf{(5.18)}$$

eşitliğinden yararlanılır.

Geri ödeme süresini (GÖS) hesaplamak için ;

Doğalgaz için birim yakıt fiyatı = 0,63 TL/$m^{3,}$

Elektrik için birim yakıt fiyatı = 0,167 TL/kWh olarak alınmıştır.

Doğalgaz alt ısıl değeri Hu = 10,48 kWh/m^3

$$GÖS = \frac{\ln\left[\frac{İYM.(i-d)}{Kar}+1\right]}{\ln(\frac{1+i}{1+d})} \qquad \textbf{(5.19)}$$

eşitliği kullanılır. Burada i interest (faiz oranı), d ise discount (iskonto) olarak tanımlanır. Sistemin kullanım ömrü boyunca güneş enerjisinden elde edilen parasal kazanç ise aşağıdaki denklemden bulunur. Sistemin kullanım ömrü 20 yıl kabul edilmiştir. 20 yıl boyunca sistemden elde edilecek tasarruf da (5.20) eşitliğiyle gösterilmektedir.

$$C_S = n.(1+i).Kar \qquad \textbf{(5.20)}$$

Bu eşitliklere göre ortaya çıkan geri ödeme süreleri ve sistem ömrü boyunca elde edilen tasarruflar ile sistemlerin ekonomik olarak karşılaştırılmaları yapılmıştır. Geri ödeme süreleri hesaplamaları sonucuna göre kazan ve güneş enerjisi sistemi geri ödeme süresi en kısa olan olsa da, kullanım ömrü boyunca ortaya çıkacak olan tasarrufu en yüksek olan ısı pompalı, kazanlı ve güneş enerjili kombine sistemdir.

5.8 Gerçek Isı Pompası Performansının Karşılaştırılması

Isıtma sistemi modellenmesi yapılan binada, gerçek ısı pompası sistemi kullanılması durumunda ortaya çıkacak olan sistem performansı incelenmiştir. Bunun için binanın ısı ihtiyacına uygun, özellikleri ve seçim tabloları Ek C'de verilen toprak kaynaklı, ClimateMaster marka, Tranquility Water-to-Water (TMW) Series TMW060 model ısı pompası ele alınmıştır. Bu ısı pompasında soğutucu akışkan olarak R410A kullanılmaktadır. Yapılan hesaplamalarda buharlaştırıcıya giriş ve yoğuşturucudan çıkış sıcaklıkları sırasıyla 5°C ve 40°C seçilmiştir. Buna göre ısı pompası kapasitesi 16,39 kW ve ortalama ısıtma tesir katsayısı ortalama 4,64 olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.4'te, seçilen ısı pompasının 40°C yoğuşturucu çıkış sıcaklığı için, çeşitli buharlaştırıcıya giriş sıcaklıklarına göre kompresör gücü, COP, kondensere verilen ısı ve topraktan çekilen ısı miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : Seçilen ısı pompasının özellikleri

T_{buh} (°C)	Kompresör Gücü (kW)	Kondensere verilen ısı (kW)	COP	Topraktan çekilen ısı (kW)
5	4,00	16,39	4,17	12,40
10	4,065	17,22	4,31	13,15
15	4,04	18,655	4,7	14,65
20	4,015	19,2	4,85	15,2
25	4,015	20,55	5,18	16,55

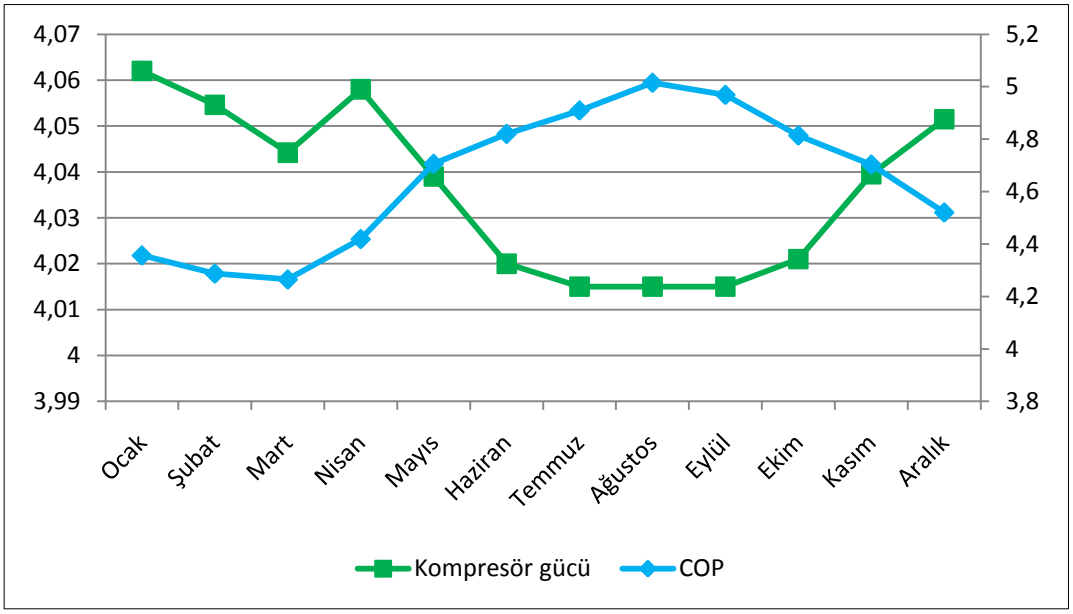
Isı pompasının karakteristik değerlerine göre COP 4,17 ile 5,18 arasında değişim göstermektedir ve kompresör gücü de ortalama 4,03 kW'tır.

İstanbul için toprak sıcaklıkları aylık ortalama olarak elde edilmiştir ve ısı pompası değerleri enterpolasyon yapılarak aylık veriler Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Ayrıca ısı pompasının ısıtma kapasitesinin de toprak sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Isıtma kapasitesi binanın ısı ihtiyacını karşılayacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 5.5 : Aylık ortalama toprak sıcaklıkları ve ısı pompası değerleri değişimi

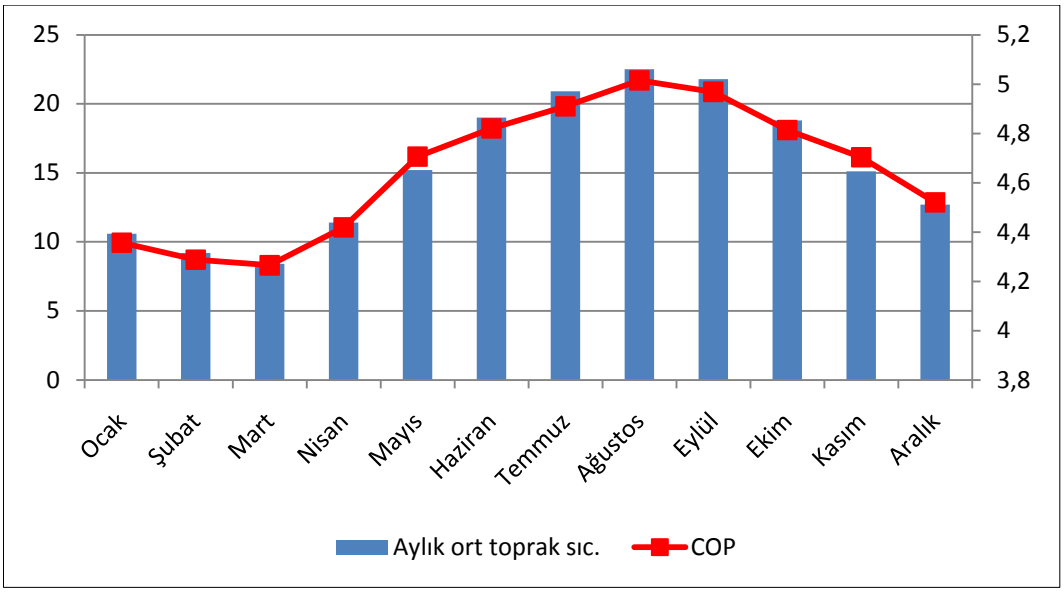
Ay	Aylık ort hava sıc. (°C)	Aylık ort toprak sıc. (°C)	COP	Kompresör Gücü (kW)	Isıtma Kapasitesi(kW)
Ocak	5,43	10,6	4,3568	4,062	17,3922
Şubat	5,7	9,2	4,2876	4,0546	17,0872
Mart	5,83	8,4	4,2652	4,0442	16,9544
Nisan	9,43	11,4	4,4192	4,058	17,6218
Mayıs	15,064	15,2	4,706	4,039	18,6768
Haziran	19,545	19	4,82	4,02	19,091
Temmuz	22,4	20,9	4,9094	4,015	19,443
Ağustos	21,128	22,5	5,015	4,015	19,875
Eylül	20,2	21,8	4,9688	4,015	19,686
Ekim	14,247	18,8	4,814	4,021	19,0692
Kasım	7,7915	15,1	4,703	4,0395	18,6659
Aralık	5,82	12,7	4,5206	4,0515	17,9949

Yukarıdaki aylık tabloya göre aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Şekil 5.20'de yıl boyunca kompresör gücü ve COP değişim grafiği gösterilmektedir. Buna göre kompresör gücü arttıkça, COP'nin azaldığı görülmektedir. Kompresör gücü arttıkça tüketilen güç de artacağından performans katsayısının değerinin azalması normaldir.



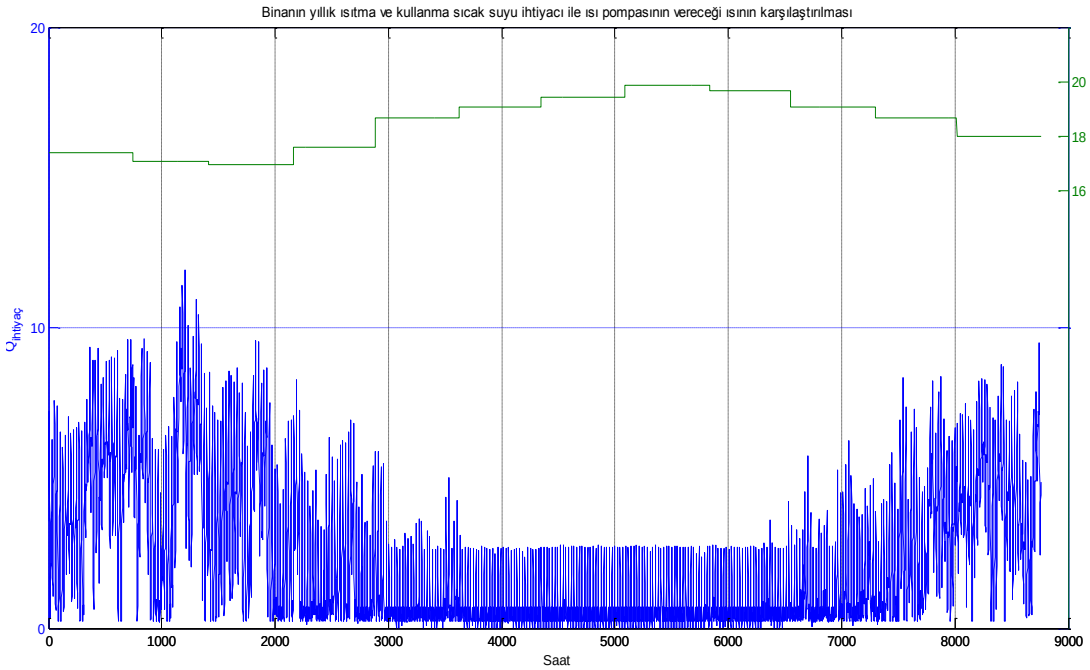
Şekil 5.20 : Yıl boyunca kompresör gücü ve COP değişimi

Aylık ortalama toprak sıcaklığı ve COP arasında ise doğru orantılı bir ilişkilendirme yapılabilir. Toprak sıcaklığı arttıkça evaporatörün çekebileceği ısı da artacağından performans katsayısında da artış gözlenir.



Şekil 5.21 : Yıl boyunca aylık ortalama toprak sıcaklığı ve COP değişimi

Aşağıdaki şekilde ise binanın ısıtma ihtiyacı ve gerçek ısı pompasının verdiği ısı değerleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Gerçek ısı pompasının verdiği ısı değerlerine aylık ortalama toprak sıcaklığına göre enterpolasyon yapıldığından, çizgi basamak basamak görülmektedir. Şekilden de gözlemlendiği gibi seçilen ısı pompasının verdiği ısı, ihtiyacın üzerindedir ve ısıtmada bir sorun yaratmamaktadır.



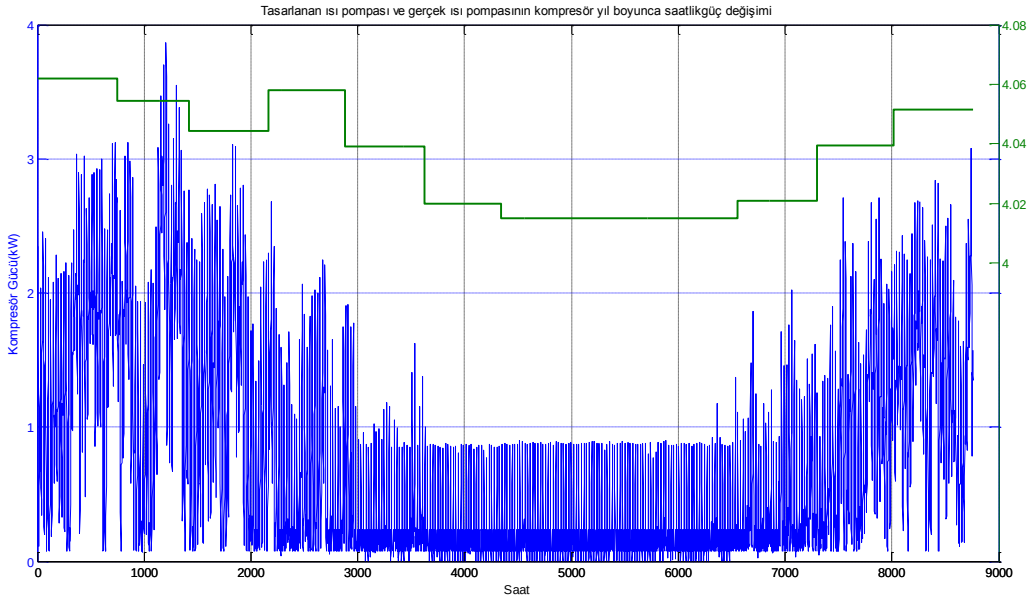
Şekil 5.22 : Binanın ısıtma ihtiyacı ve ısı pompasının verdiği ısının karşılaştırılması

Gerçek ısı pompası kompresör gücünün ortalaması alınmış günlük değişimi Şekil 5.23'de gösterilmektedir. Ancak kompresörün çektiği güç çok fazla olmadığından, tek kademeli olarak çalışmaktadır ve her çalıştığında ortalama bir güç tüketimi ve sabit davranış göstermektedir.



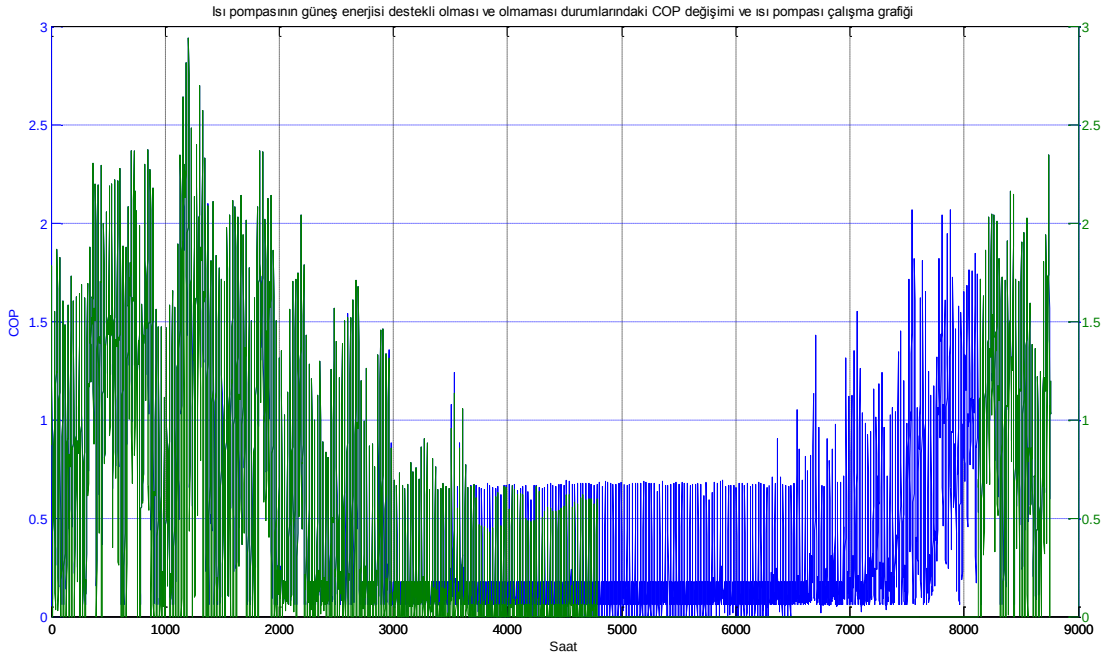
Şekil 5.23 : Gerçek ısı pompası kompresör gücünün yıllık ortalama günlük değişimi

Bir önceki bölümde modellenen ve sonuçları incelenen toprak kaynaklı ısı pompası ile gerçek ısı pompasının karşılaştırması yapılmıştır. Isı ihtiyacını karşılayabilecek gerçek ısı pompası kompresörünün gücü, tasarlanana göre daha büyük kapasitededir.



Şekil 5. 24 : Tasarlanan ısı pompası ve gerçek ısı pompasının kompresörlerinin yıl boyunca saatlik güç değişimi

Gerçek ısı pompası tüketiminde de güneş destekli olması durumu ve tek başına olması durumlarının kıyaslaması yapılmıştır. COP'ler hemen hemen aynı olmasına rağmen tek ısı pompasının 8389 saat çalışması gerekirken, güneş destekli olanın yılda 3747 saat çalışması yeterlidir, böylece elektrik tüketimi oldukça azalmış olur.



Şekil 5. 25 : Isı pompasının güneş enerjisi destekli olması ve olmaması durumlarındaki COP değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada binalarda ısı pompalı ve güneş enerjili sistemlerin çeşitli çalışma senaryolarına göre davranışları incelenmiş ve ekonomik analizde konvansiyonel sistemle karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca gerçek bir ısı pompası sistemi de binaya uygulanarak, tasarlanan sistemle karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir.

İstanbul'daki 185 m^2 bir bina için çeşitli sistemler uygulanmış, buna göre MATLAB ile bir program hazırlanmıştır. Bu program ile tüm sistemler değerlendirilip parametrik çalışma yapılmış ve sistemlerin performansları incelenmiştir. Sistemde düşük sıcaklıkta iyi verim sağlayabilen alüminyum radyatörler ve yoğuşmalı kombi kullanılmıştır. Ayrıca toprak ısı değiştiricisi uzunluğunu bulmak için yapılan hesaplamalar sonucunda 214 m yatay serme boruya gereksinim duyulduğu anlaşılmıştır.

Çeşitli senaryolara göre yapılan geri ödeme süreleri hesaplamaları sonucunda ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Buna göre kazan ve güneş enerjisi sistemi geri ödeme süresi en kısa olan sistemdir ancak kullanım ömrü boyunca ortaya çıkacak olan, tasarrufu en yüksek olan sistem ısı pompalı, kazanlı ve güneş enerjili kombine sistemdir. Geri ödeme süresi ise 5,87 yıl olarak bulunmuştur.

Çizelge 6. 1: Geri ödeme süreleri özet tablosu

Geri Ödeme Süreleri	**GÖS**	**20 Yıl Boyunca Elde Edilecek Olan Kar**
Kazanlı ve Kazanlı+Güneş Enerjili Sistem	5,68	87.769,96 TL
Kazanlı ve Isı Pompalı Sistem	7,11	59.459,24 TL
Kazanlı ve Isı Pompalı+Güneş Enerjili Sistem	7,28	91.914,55 TL
Kazanlı ve Çift Kaynaklı Isı Pompalı Sistem	6,63	106.341,45 TL
Kazanlı ve Kombine Sistem	5,87	134.095,28 TL

Sistemlerin çok çeşitli uygulamaları ve bağlanma şekilleri mevcuttur . Bu bağlantılar yapılırken otomatik kontroller ve senaryolar sistemin sağlığı ve güvenliği açısından önem kazanmaktadır. Kontrol entegrasyonu düzgün sağlanamazsa sistemde tehlike

oluşabilir. Bu yüzden konfor şartları ve enerji verimliliği sağlanacak biçimde en uygun sisteme, bir bütün halinde ele alınıp karar verilmelidir.

Bu programa arayüz hazırlanıp, sistemlerin davranışlarının incelenmesinde kolaylıkla kullanılır hale getirilebilir. İstanbul yerine diğer illerin de meteorolojik şartları değerlendirilip ısı ihtiyaçları, güneş ışınımları hesaplanıp istenen sistemler modellenebilir. Doğalgaz yerine fuel-oil, kömür, LPG, LNG v.b. gibi farklı yakıtların kıyaslamaları yapılarak hangisinin daha uygun olacağı tahmini yapılabilir. Kullanılan sistemler farklı amaçlara yönelik binalara da hizmet verdiğinde radyatör yerine fan-coil, yerden ısıtma, klima santrali gibi sistemler tercih edilebilir. Ayrıca fan- coil, klima santrali gibi sistemler tercih edildiğinde aynı zamanda soğutma ihtiyacı da karşılanabilir hale gelecektir. Böylece sistem daha efektif çalışmış olacak, soğutma ihtiyacını da giderdiği için ilk yatırım maliyetini geri ödeme süresi kısalacaktır.

KAYNAKLAR

Acaroğlu, M., 2003, Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayın Dagıtım Ltd. Sti., 341 s.

Anonim 1, http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/tgunes.html

Ataman. H., 1991. "Toprak kaynaklı bir ısı pompası tesisinin tasarımı ve optimizasyonu ". Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 114s**.**

Badescu, V., 2002, Model of solar-assisted heat-pump system for space heating.

Capehart, B., Turner, W. and Kennedy, W., 2002, Guide to Energy Management (Fourth Edition), Marcel Dekker Incorporated , 566 p.

Demir, H., 2006, Toprak Kaynaklı Isı Pompası ve Toprak Isı Değistiricilerinin Optimizasyonu ve Gelistirilmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 145 s.

Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991, Solar Engineering of thermal processes, JohnWiley and sons, 919 p.

Dwivedi,V, 2009,Thermal Modelling and Control of Domestic Hot Water Tank, Master of Science in Energy Systems and the Environment, 94 p.

Esen, H ve İnallı, M, 2003, Elazığ İklim Şartlarında Yatay Borulu Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Performansı, F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2), 109-117.

Goswami, Y.D., Kreith, F. and Kreider, J.F., 1999, Principles of solar engineering, George H. Buchanan Co., 694 p.

Gündüz,B, 2007, Bilecik ilinde Güneş Enerjiisi Destekli Isı pompasının Sıcak Su Üretiminin Performansı, Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 120s**.**

Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Ground Source Heat Pumps-Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, Atlanta.

Kaygusuz K., 2000, Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump, Renewable energy, 21, 79-102

Kılıç, A. ve Öztürk, A., 1983, Güneş Enerjisi, Kipaş Dagıtımcılık, 328 s.

Kreider, J., F, 1975, Solar heating and cooling, Hemisphere publishing co., 212p

Lunde, P,1980,Solar Thermal Engineering, Hartford Graduate Center,JohnWiley and sons.

Olcay Kıncay,Güneş Enerjisi Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Özdemir, M. ve Parmaksızoğlu, C., 2003, Mekanik Tesisatta Ekonomik Analiz, Teskon 2003, VI. Tesisat Mühendisliği Kongresi.

Özgener, Ö. and Hepbaşlı, A., 2007, A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems, Renewable and sustainable energy reviews, 11, 482-496.

Öztürk, A., 1985, Güneş enerjili ve ısı pompalı ısıtma sistemleri, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 84 s.

Sukhatme, 1984,Solar Energy, Principles of Thermal Collection and Storage,

Ünsal, M, and Söylemez S,1989, 'Long Term Efficiency of Solar Aided Water Heating Systems with Double Thermal Energy Storage Tanks', NATO Workshop on Energy Storage Systems, NATO ASI Series, Edited by B. Kılkış and S. Kakaç, Kluwer Academic Publishers, pp. 683-694, 1989.

Yamaç, Ö., 2005, Güneş enerjili destekli ısı pompalarının teorik incelenmesi, Master Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s.

Yamankaradeniz, R, 1982, Güneş enerjisi kaynaklı ısı pompasının teorik ve deneysel olarak incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, 111 s

EKLER

EK A : MATLAB Programlama Kodları (CD içerisinde)

EK B : Bina Yıllık- Saatlik Isıtma İhtiyacı (CD içerisinde)

EK C : Isı pompası seçim çizelgeleri ve kataloğu (CD içerisinde)

ÖZGEÇMİŞ

Ayça ESEN,21.05.1986 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini İstek Vakfı Özel Acıbadem Fen Lisesi'nde 2004 yılında tamamladı ve 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden lisans derecesini aldı. Ayça ESEN halen İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isı-Akışkan programı yüksek lisans öğrencisidir ve EVD Enerji Yönetimi'nde çalışmaktadır.