

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**IĞDIR İLİNDE DOĞAL TAŞTAN (ANDEZİT) BİR EVİN, ENERJİ
İHTİYACINI KARŞILAYACAK OLAN PV SİSTEMİNİN
TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

Aydın ATALAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Erdem IŞIK

TUNCELİ-2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İĞDIR İLİNDE DOĞAL TAŞTAN (ANDEZİT) BİR EVİN, ENERJİ
İHTİYACINI KARŞILAYACAK OLAN PV SİSTEMİNİN
TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

Aydın ATALAR
(220077113)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Erdem IŞIK

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

IĞDIR İLİNDE DOĞAL TAŞTAN (ANDEZİT) BİR EVİN, ENERJİ
İHTİYACINI KARŞILAYACAK OLAN PV SİSTEMİNİN
TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Aydın ATALAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 04/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüseyin BENLİ
(Fırat Üniversitesi)

BAŞKAN

Doç. Dr. Erdem IŞIK
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

Doç. Dr. Gökhan KAHRAMAN
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Altuğ KAZAR
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Aydın ATALAR

Danışman
Doç. Dr. Erdem IŞIK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın başında sonuna kadar bilgisini, deneyimini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Erdem IŞIK Hocama değerli emeklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi eğitim hayatım boyunca da desteklerini her daim hissettiğim annem, babam ve kardeşlerime en içten duygularım ile teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince anlayış ve sabır gösteren kıymetli eşim Lalezar NASİN ATALAR ile sevgili çocuklarıma yürekten sevgi ve şükranlarımı sunarım.

**Aydın ATALAR
TUNCELİ-202**



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLOLAR LİSTESİ	VII
RESİMLER LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
ÖZET.....	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. GÜNEŞTEN ENERJİ ELDE EDİLMESİ.....	8
3.1. PV (Fotovoltaik) Sistemler ve Özellikleri	9
3.1.1. PV (fotovoltaik) hücre çeşitleri	10
3.1.2. PV (fotovoltaik) sistem çeşitleri	15
3.1.2.1. PV (fotovoltaik) sistemleri meydana getiren unsurlar.....	17
3.1.2.2. PV/T (fotovoltaik/termal) sistemler ve özellikleri.....	18
3.2. Termal Sistemler ve Özellikleri.....	28
3.2.1. Düşük sıcaklık uygulamaları	28
3.2.1.1. Düşük sıcaklıkta su ısıtma sistemleri.....	29
3.2.1.2. Düşük sıcaklıkta hacim ısıtma sistemleri	32
3.2.2. Yüksek sıcaklık uygulamaları	33
3.2.2.1. Parabolik oluk sistemleri	34
3.2.2.2. Fresnel aynalı yoğunlaştırıcılar	35
3.2.2.3. Parabolik çanak sistemleri	36
3.2.2.4. Güneş kulesi (merkezi alıcılar).....	36
4. ISI POMPALARI	38
4.1. Isı Pompaları İçin Termodinamik Çevrimler.....	39
4.1.1. Tersine Carnot Çevrimi	39
4.1.2. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi	39
4.1.3. Gerçek buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi.....	40
4.2. Isı Kaynaklarına Göre Isı Pompaları	41
4.2.1. Su kaynaklı ısı pompaları	41
4.2.2. Hava kaynaklı ısı pompaları	42
4.2.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları	42
4.2.4. Güneş kaynaklı ısı pompaları	43
4.3. Isı Pompası ve Soğutucu Akışkanlar	44
5. MATERYAL VE YÖNTEM	46
5.1. Evin İhtiyaç Duyduğu PV Sistem Tasarımı	46
5.2. Evin Sıcak Su İhtiyacını Karşılacak Isı Pompası Tasarımı	52
5.3. Evin Yapımında Kullanılan Taşın (Andezitin) Özellikleri ve Hesaplamalar	58
6. BULGULAR.....	65
6.1. Tasarımı Yapılan PV Sistemin Analizi	65
6.2. Tasarımı Yapılan Isı Pompasının Analizi.....	69
6.3. Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Doğal Taşın Analizi.....	71

7. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. PV evaporatörünün şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Xu ve ark.'nın tasarladığı sistemin şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.3. Geleneksel IP-PV/T sistemlerinde buharlaştırıcı boruları	5
Şekil 2.4. Modifiye edilmiş IP-PV/T sisteminin buharlaştırıcı boruları	6
Şekil 2.5. Zhao ve arkadaşları tarafında tasarlanan sistemin şeması.....	6
Şekil 2.6. Wang ve ark. tarafında tasarlanan buharlaştırıcının şeması	7
Şekil 3.1. Güneşten enerji elde etme yolları.....	8
Şekil 3.2. Fotovoltaik hücre yapısı	9
Şekil 3.3. Fotovoltaik hücre	9
Şekil 3.4. Fotovoltaik sistemleri oluşturan hücre, panel ve dizi	10
Şekil 3.5. Monokristal güneş hücresi	11
Şekil 3.6. Monokristal güneş paneli.	12
Şekil 3.7. Polikristal güneş hücresi	12
Şekil 3.8. Polikristal güneş paneli.	13
Şekil 3.9. İnce film güneş paneli	13
Şekil 3.10. Şebekeye bağlı (on grid) PV sistemin şematik gösterimi	16
Şekil 3.11. Şebekeden bağımsız (off grid) PV sistem şeması	16
Şekil 3.12. Su soğutmalı bir PV/T sistemi	19
Şekil 3.13. Su soğutmalı PV/T sistemin deney düzeneği.....	20
Şekil 3.14. PV'lerin zamana bağlı sıcaklık ve verim grafiği.....	20
Şekil 3.15. Farklı hava soğutmalı PV/T tasarımları	21
Şekil 3.16. Temel ısı borusunun şematik gösterimi.	23
Şekil 3.17. Wu ve arkadaşlarınca tasarlanan IB-PV/T sistemi.....	24
Şekil 3.18. Gang ve arkadaşlarınca tasarlanan kolektör sistemi	25
Şekil 3.19. Gang ve ark.'nca tasarlanan IB-PV/T sisteminin şeması.....	26
Şekil 3.20. Zhang ve ark.'nca tasarlanan ısı pompası sistemi.....	26
Şekil 3.21. Moradgholi ve ark.'nca tasarlanan PV/T sisteminin şeması.....	27
Şekil 3.22. Camlı düzlemsel kolektör (a), Vakum tüplü kolektör (b), camsız düzlemsel kolektör (c).....	29
Şekil 3.23. Doğal dolaşimli açık sıcak su sisteminin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.24. Doğal dolaşimli kapalı sıcak su sisteminin şematik gösterimi	30
Şekil 3.25. Cebri dolaşimli açık sıcak su sisteminin şematik gösterimi.	31
Şekil 3.26. Cebri dolaşimli kapalı sıcak su sisteminin şematik gösterimi	31
Şekil 3.27. Doğrudan ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmalı sistemin şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.28. Doğrudan ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmalı sistemin şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.29. Parabolik oluk sisteminin şematik gösterimi.	35
Şekil 3.30. Fresnel aynalı yoğunlaştırıcı sisteminin şematik gösterimi	35
Şekil 3.31. Parabolik çanak sisteminin şematik gösterimi	36
Şekil 3.32. Güneş kulesi sisteminin şematik gösterimi	36
Şekil 4.1. Isı pompası genel çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	38
Şekil 4.2. Ters Carnot soğutma makinesinin şematik gösterimi ve T-s diyagramı.....	39
Şekil 4.3. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin şeması ve T-s diyagramı.....	40
Şekil 4.4. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin şeması ve T-s diyagramı.....	41
Şekil 4.5. Yüzey su kaynaklı (a.) ve yer altı su kaynaklı (b.) ısı pompası şemaları.....	42
Şekil 4.6. Hava kaynaklı ısı pompasının şematik görüntüsü.....	42
Şekil 4.7. Yatay ve dikey toprak kaynaklı ısı pompası şeması	43

Şekil 4.8. Direkt genleşmeli güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası şeması	43
Şekil 4.9. Endirekt genleşmeli güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası şeması.	44
Şekil 5.1. PV sistemin kurulacağı yerin PV*SOL programında seçilmesi	47
Şekil 5.2. PV sistemin kurulacağı alandaki verilerin programa yerleştirilmesi	48
Şekil 5.3. PV*SOL programında panellerin gölge analizi	48
Şekil 5.4. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi genel şeması	52
Şekil 5.5. Isı pompası sistemi ve T-s diyagramı	55
Şekil 5.6. En düşük duvar kalınlığı	61
Şekil 5.7. Farklı kotlarda çıkarılan doğal taşlar için en düşük duvar kalınlıkları	62
Şekil 5.8. Taş evin zemin kat planı	62
Şekil 5.9. Taş evin normal kat planı	63
Şekil 5.10. Taş evin çatı kat planı	63
Şekil 5.11. Evin ısı yalıtım standartlarına uygunluğu	64
Resim 5.4. Evin imalat sonrası görünüm	64
Şekil 6.1. Modül başına ısıtım grafiği	65
Şekil 6.2. Modül alanı başına sıcaklık grafiği	66

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. PV güneş hücrelerinin oluşum enerjileri	14
Tablo 3.2. Farklı fotovoltaiik teknolojilerin avantaj ve dezavantajları.....	15
Tablo 3.3. Farklı PV/T sistemlerin avantaj ve dezavantajları.....	28
Tablo 3.4. Yoğunlaştırılmış sistemlerinin teknik ve ekonomik kıyası	37
Tablo 4.1. Soğutucu akışkanların ozon tabakasına etkileri ile sera etkisi.....	45
Tablo 5.1. Evde kullanılacak cihazlara ait veriler (cihaz etiketleri)	49
Tablo 5.2. Kullanılacak panellerin performans değerleri (ürün etiketi)	50
Tablo 5.3. Kullanılacak inverter performans değerleri (ürün etiketi).	52
Tablo 5.4. Iğdır ilinin aylık ortalama güneşlenme süreleri.	53
Tablo 5.5. Yoğuşturucudan çekilecek aylık ortalama anlık ısı yükleri.....	54
Tablo 5.6. Isı pompası tarafından üretilebilecek aylık ortalama enerji değerleri	54
Tablo 5.7. Numunelerin laboratuvar ölçüm sonuçları	60
Tablo 6.1. PV sistem kurulum maliyeti çizelgesi	68
Tablo 6.2. PV sistem ile sadece şebekeli sistem maliyet karşılaştırma çizelgesi	69
Şekil 6.3. PV sistemin amorti grafiği.....	69
Şekil 6.4. Isı pompası sisteminde üretilen ve gerek duyulan enerji dağılım grafiği.....	70
Şekil 6.5. Isı iletkenlik katsayı tespiti yapılan numunelere ait ölçüm grafiği.....	71

RESİMLER LİSTESİ

Resim 5.1. Yapımı planlanan evin üç boyutlu tasarımı	58
Resim 5.2. Söz konusun evin yapımında kullanılan taşlar	59
Resim 5.3. Doğal taş numuneleri	60
Resim 6.1. Uygulaması gerçekleştirilen sistemde kullanılan panellerin görünümü	67
Resim 6.2. Kurulumu yapılan sistemin ekipmanları	67



SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan
As	: Arsenit
A_{deşj.}	: Akü Deşarj Oranı
A_{sıc.k.}	: Akü Sıcaklık Katsayısı
c	: Işığın Boşluktaki Hızı
Cd	: Kadmiyum
CdTe	: Kadmiyum Tellür
CIGS	: Bakır İndiyum Galyum Selenit
COP_{ip}	: Isı Pompasının Etkinlik Katsayısı
C_p	: Suyu Özgül Isısı
°C	: Santigrat Derece
Ds	: Enerjinin Aküden Sağlanacağı Gün Sayısı
E_{gün.ih.}	: Günlük İhtiyaç Duyulan Enerji
Ep	: Panelin Üreteceği Enerji
Ga	: Galyum
GaAs	: Galyum Arsenit
G_p	: Panel Gücü
GWP	: Sera Etkisi
Hz	: Hertz
h	: Entalpi
hf	: Doymuş Sıvı Entalpisi
I_a	: Akü Akım Değeri
I_{mp}	: Panellerin Maksimum Güç Akımları
I_{ş.k}	: Şarj Kontrol Cihazının Giriş Akımı
İ_{nvk}	: İnverter Kapasitesi
K	: Kelvin
K	: Isı Transfer Katsayısı
Kg	: Kilogram
kPa	: Kilo Paskal
kW	: Kilo Watt
m	: Kütle
ṁ	: Kütlesel Debi
m_b	: Boylerdeki Su kütlesi
ODP	: Ozon Tabakasına Etki
s	: Entropi
Si	: Silisyum
Ş.K.S	: Şarj Kontrol Cihazı Sayısı
Te	: Tellür
T_ç	: Çıkış Sıcaklığı
T_g	: Giriş Sıcaklığı
T_{yıllık}	: Elektrik Enerjisi Yıllık Tüketim Bedeli
t_{d.şirkt.}	: Dağıtım Şirketi Tarifesi
t_g	: Aylık Ortalama Güneşlenme Süresi
t_{g.s}	: Ortalama Günlük Güneşlenme Süresi
V_a	: Akü Voltajı

η	: Verim
$\eta_{akü}$	: Akü Verimi
η_k	: Kompresör Verimi
η_{panel}	: Panel Verimi
$\eta_{sis.}$	: Sistem Verimi
$\dot{Q}_b$	: Boyler Isı Yüğü
$\dot{Q}_{evap.}$	: Evaporatörden Çekilen Anlık Isı Yüğü
$\dot{Q}_k$	: Kondenserden Çekilebilecek Anlık Isı Yüğü
$\dot{Q}_{ü}$	: Isı Pompasının Üretebileceğı Isı
$\dot{Q}_{y.ort.}$	: Yıllık Anlık Isı Yüğü Ortalaması
ΔT	: Sıcaklık Farkı
ΔT_m	: Logaritmik Ortalama Sıcaklık



KISALTMALAR LİSTESİ

AB	: Avrupa Birliği
AC	: Alternating Current
AS	: Akü Sayısı
COP	: Coefficient Of Performance
DC	: Direct Current
HKFK	: Hidrokloroflorokarbonlar
IB-PV/T	: Isı Borulu Fotovoltaik / Termal
IP-PV/T	: Isı Pompalı-Fotovoltaik / Termal
KFK	: Kloroflorokarbonlar
PS	: Panel Sayısı
PV	: Fotovoltaik
PV/DIB	: Fotovoltaik/Döngü-Isı Borulu
PV/e	: Fotovoltaik / Evaporatör
PV/T	: Fotovoltaik/ Termal
TGÜB	: Türkiye Gaz Beton Üreticileri Birliği
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TW	: Terawatt
YGE	: Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi

ÖZET

Fotovoltaik sistemler; güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olup, her geçen gün dünya genelinde bu sistemlerin kullanımı artmaktadır. Genellikle düşük verimle çalışan solar panellerin, artan sıcaklık ile verimleri daha da düşmektedir. Bu nedenle kurulacak bir fotovoltaik sistem için verimi arttıracak parametrelerin optimum düzeyde seçilmesi oldukça önemlidir. Bu çerçevede yapılan bu tez çalışmasında; Iğdır ilinde doğal taştan yapılan bir evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini karşılayacak PV sistemin önce analizi ve hesaplamaları ardında da uygulaması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi miktarı tespit edilip ardından bu enerjiyi sağlayacak PV sistemin kurulacağı lokasyonun; PV*SOL programının veri tabanında yer alan iklim verilerine göre gölge analizi, panel eğimi ve sistem açısı simülasyonu gerçekleştirilerek optimum parametreler belirlenmiştir.

Daha sonra söz konusu evin ihtiyacı olan 500 lt sıcak suyu 50°C’de sağlayacak ve aynı zamanda PV panellerinin, güneş ışıınımları neticesinde artan ısılarını düşürerek verimlerini arttıracak ısı pompasının tasarımı ve teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Böylece sistemin Fotovoltaik / Termal sistemine dönüştürülmesinin analizi gerçekleştirilmiştir. Evaporatörü PV paneller ve soğutucu akışkanı R134a olarak seçilen ısı pompasının COP değeri 4.14 olarak hesaplanmıştır.

Yapımında; Iğdır yöresinde yer altından çıkarılan doğal taş (Andezit) malzeme kullanılan evin TS 825 standartlarına göre ısı yalıtım hesabı gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda, yeraltında çıkarılan malzemelerin laboratuvar ortamında ölçülen ısı iletkenlik katsayıları kullanılmıştır. Farklı kotlarda çıkarılan taşların ısı iletkenlik katsayıları ve fiziksel özellikleri kıyaslanmıştır. Ayrıca herhangi bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmadan sadece bu doğal taşların kullanılmaları durumunda olabilecek en düşük duvar kalınlıkları İZODER TS 825 programı yardımı ile hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: PV, PV/T sistemler, COP, ısı pompası, andezit

ABSTRACT

Thermo-Economic Analysis Of PV System That Will Provide The Energy Requirement Of A Natural Stone (Andesite) House In Iğdır Province

Photovoltaic (PV) systems are structures that convert solar energy into electrical energy and the use of these systems is increasing worldwide day by day. The efficiency of solar panels, which generally operate with low efficiency, decreases even more with increasing temperature. For this reason, it is very important to select the optimum level of parameters that will increase the efficiency of a PV system to be installed. In this thesis study, firstly the analysis and calculations and then the application of the PV system that will meet the electrical energy required by a house made of natural stone in Iğdir province were carried out. Firstly, the amount of electrical energy required by the house was determined and then the optimum parameters were determined by simulating shade analysis, panel inclination, and system angle according to the climate data in the database of the PV*SOL program.

Then, the design and theoretical calculations of the heat pump, which will provide 500 litres of hot water at 50°C and at the same time increase the efficiency of the PV panels by reducing their increased heat as a result of solar radiation, have been carried out. Thus, the transformation of the system into a PV/T system has been analysed. The COP value of the heat pump, whose evaporator is PV panels and refrigerant is selected as R134a, is calculated as 4.14.

In the construction of the house; natural stone (Andesite) material extracted from the underground in the Iğdir region was used and thermal insulation calculation was carried out according to TS 825 standards. In these calculations, the thermal conductivity coefficients of the underground materials measured in the laboratory environment were used. The thermal conductivity coefficients and physical properties of the stones extracted at different elevations were compared. In addition, the lowest possible wall thicknesses in the case of using only these natural stones without using any thermal insulation material were calculated with the help of the İZODER TS 825 program.

Keywords: PV, PV/T systems, COP, heat pump, andesite

1. GİRİŞ

Çağımızda; bilim ile teknolojinin sürekli gelişmesi ve bu ikisine bağlı olarak da sanayileşmenin artması sonucu enerji arzı ve maliyetleri her geçen gün artmaktadır. Bir toplumun fiziksel gelişmişliğini gösteren parametrelerden bir tanesi de o toplumun enerjiyi üretme ve kullanma disiplini. Üretilen enerjinin kullanılan enerjiden daha büyük olması ve enerjinin verimli kullanılması, enerji tasarrufunun ve planlanmasının temelini oluşturmaktadır. Fiziksel anlamda gelişmiş toplumların; toplumun veya bireylerin enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde, sağlanmasında ve dağıtılmasında planlı hareket ettikleri görülmektedir. Yaşadığımız yüz yılda konvansiyonel enerji kaynaklarının (kömür, petrol, doğalgaz vb.) sınırlı olması ve ülkelerin enerji politikalarında kaynaklanan soğuk savaş atmosferinin oluşturduğu etki nedeni ile bu planlı hareket, zorunlu planlı hareket biçimini almıştır.

Bu dönemde sürmekte olan Ukrayna-Rusya savaşının bütün dünyayı ekonomi yönü ile etkisi altına almasının yanı sıra, yaklaşan kış mevsimi ile Rusya karşıtı Avrupa ülkelerini tabiri caiz ise enerji paniği kuşatmış durumdadır. Avrupa ülkeleri; Rusya'nın gaz sevkiyatını düşürmesi ile gaz ve elektrik fiyatlarının artması nedeniyle enerji krizinin etkilerini ve yaklaşan kış mevsiminin yükünü hafifletmek için her geçen gün önlemler almaktadırlar. Bu bağlamda; Avrupa Birliği (AB), enerji tasarrufu için hazırladığı gaz acil durum planını hayata geçirdi. Bu planla Avrupa Birliği ülkelerinin Mart 2023 sonuna kadar gaz tüketimlerini, son beş yıldaki ortalama gaz tüketimlerine kıyasla %15 oranında gönüllü olarak azaltmaları hedefleniyor. Bunun yeterli olmaması durumunda tasarruf önlemlerinin zorunlu hale getirilmesi planlanıyor. Bununla birlikte AB ülkelerinden Almanya'da; kömür santrallerinin yeniden faaliyete geçirmesi planlandı. Düzenli kullanılmayan mekânların ısıtılmaması tavsiye edildi, Berlin ve Köln'de yapıların gece ışıklandırması söndürüldü. Hollanda'da; gaz depolarının tamamen doldurulması ve kömür santrallerinin faaliyet sürelerinin uzatılması planlandı. Kamu binalarının daha düşük derecede ısıtılması kararı alındı. İspanya'da; 27 °C'nin altında klima kullanımı yasaklandı, saat 22.00'den sonra kamu binaları ve mağaza vitrinlerinin ışıklarının kapatılması kararı alındı. Avusturya'da; sıcak su yerine soğuk su kullanımı tavsiye edildi, Viyana'da tarihi ve resmi yapıların ışıklandırılmasının kısıtlanması kararı alındı. Bununla birlikte diğer AB ülkelerinin birçoğunda benzer eylem planları ile kampanyalar başlatıldı.

Bu nedenle özellikle güçlü ülkeler (sanayisi ve teknolojisi gelişmiş olan) bir taraftan fosil enerji kaynakları üzerindeki etkinliklerini arttırmaya çalışırken öte taraftan söz konusu fosil enerji kaynaklarının sınırlı oluşu bu ülkeleri, yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı arayışına sokmuş olmak ile birlikte bu alanda arge çalışmalarına büyük miktarlarda ödenekler ayırmalarına / harcamalarına neden olmuştur. Bu bağlamda enerjinin tedarikinde sürdürülebilirliğin sağlanması için; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi vb. kaynağı süreklilik arz eden enerji kaynaklarının kullanımları ve kurulu kapasiteleri arttırılmalı ayrıca bu alanlarda teknolojik gelişmeler takip edilmelidir.

Yenilenebilir enerji kaynakları içinden en büyük paya sahip olanın güneş enerjisi olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Yaklaşık olarak 174.000 TW güneş radyasyonu, dünya atmosferinin üst seviyesi tarafından sürekli alınmaktadır. Bir saat içinde dünyaya ulaşan güneş enerjisi, insanlığın yıllık enerji ihtiyacının tamamını karşılayabilecek potansiyelde olduğu dikkatimize sunulmaktadır (Sefer, 2023). Bahsedilen bu potansiyelden; fotovoltaik (PV) paneller vasıtası ile elektrik enerjisi, güneş kolektörleri vasıtasıyla ısı enerjisi olarak faydalanmanın yanı sıra PV/T sistemler vasıtasıyla hem elektrik hem de ısı enerjisi olarak faydalanılmaktadır. Enerji kaynaklarının sınırlı olduğu günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynak arayışının yanı sıra üretilen enerjinin verimli kullanımı da son derece önem arz etmektedir. Bu çerçevede yapılan bu çalışmada, konveksiyonel enerji kaynaklarının kullanımının azaltılıp yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında, Iğdır ilinde doğal taştan yapılan bir evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini karşılayacak fotovoltaik sistemin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte sisteme entegre edilebilecek ve evin ihtiyaç duyduğu sıcak su ihtiyacını karşılayacak ısı pompasının tasarımı ile teorik boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra evin yapımında kullanılan doğal taşların (Andezit) laboratuvar ortamından ısı iletkenlik katsayısı ölçümü yaptırılarak, bu katsayılar kullanılarak evin TS 825 standartlarına göre ısı yalıtım hesabı gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

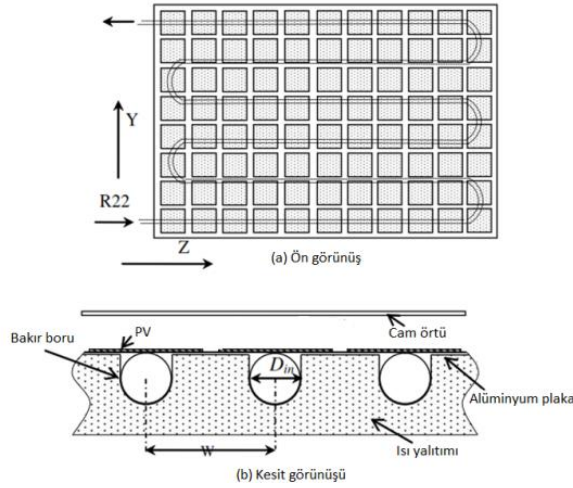
Fosil kökenli enerji kaynaklarının sınırlı oluşları ve bu kaynakların çevreyi kirletici olmaları nedeni ile bu kaynaklara alternatif olarak, yenilenebilir enerji kaynakları her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında da hem kapasite olarak hem de birçoğuna nazaran daha istikralı yapıda olan güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır.

Güneşten enerji elde etme temelde iki yoldan gerçekleştirilebilir. Bunlardan biri Fotovoltaik (PV) yol ile elektrik enerjisi elde edilmesi iken diğeri güneşin ısısından faydalanarak ısı enerjisi elde edilmesidir. PV'lerden en verimli şekilde faydalanmak için çalışma şartlarında PV'lerin sıcaklık artışlarını minimize etmemenin gerekliliği literatüre bakıldığında birçok deneysel çalışmada vurgulanmıştır. Bu nedenle Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistemlerin kullanılması ile güneşten elektrik ve ısı enerjileri aynı anda elde edilebilmekte böylelikle PV'lerin ihtiyaç duyduğu soğutma sağlanarak daha yüksek sistem performansı değerlerine ulaşılmaktadır.

PV/T'ler kullandıkları soğutucuya göre; su soğutmalı, hava soğutmalı, ısı borulu ve ısı pompalı olarak sıralanabilirler. Bu çalışmada ısı pompalı yani soğutucu akışkan kullanılarak soğutma sağlanan bir PV/T sistemi tasarlandığından literatür taraması ağırlıklı olarak Isı Pompalı-Fotovoltaik/Termal (IP-PV/T) sistemlere yönelik yapılmıştır. Literatürde yer alan bazı IP-PV/T sistemlerine aşağıda yer verilmiştir.

Gündüz (2007), Bilecik ilinde bir dairenin güneş enerjisi destekli ısı pompası ile ısıtılmasının desteklenmesi için yerden ısıtma sistemi tasarlamıştır. Isı pompası sisteminin, 7 aylık süre zarfında verimli bir biçimde çalışması için Ocak-Mart, Kasım ve Aralık ayları için ek ısıtıcıya ihtiyaç duyulacağı belirlenmiştir. Isı pompası sisteminin COP değerinin 3.1 olduğu belirtilmiştir.

Ji ve ark. (2009), yeni bir PV/T güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu ısı pompası sisteminde hem elektrik enerjisini hem de ısı enerjisini elde etmeyi hedeflemişlerdir. Bu sistemde PV panelleri ısı pompasının evaporatörü olarak tasarlanmış olup şematik gösterimleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. PV evaporatörünün şematik gösterimi (Ji ve ark. 2009).

Sistemde soğutucu akışkan olarak R22 kullanılmıştır. Ampirik sonuçlardan ve simülasyon sonucunda elde edilen neticelerin karşılaştırılması ampirik ve sayısal çalışmanın takribi olarak benzer neticeleri verdiği bulunmuştur. Sistemin PV verim performansının diğer PV/T sistemlerine göre daha büyük ve %12'den fazla olduğu bulunmuştur.

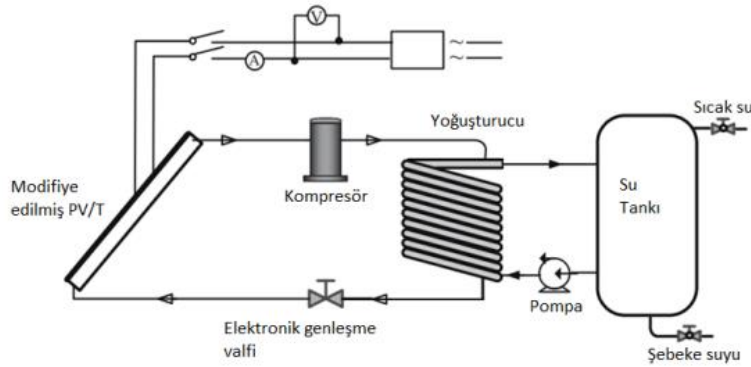
Özyaman (2011), İzmir'de 120 m² net kullanım alanına haiz bir işyerinde güneş enerjisi destekli ısı pompası kullanılarak ısınma ve sıcak su üretimi amaçlanmıştır. Kullanılan elektrik enerjisinin %97'si ısı pompası ve güneş enerjisi sisteminin pompa, kompresör, fan gibi elemanlarının kullandığı elektrik enerjisi olup %3'ü ise ısı pompasının kafi gelmediği iklim koşullarında devreye giren elektrikli ısıtıcıdan kaynaklandığını belirtmiştir.

Aktaş ve ark. (2013), güneş enerjili ve ısı pompalı bir kurutucu tasarlayarak imalatını gerçekleştirmişlerdir. Bu kurutucuda kivi kurutarak verileri deneysel olarak incelemişlerdir. Isı pompası performans kat sayısı ile tüm sistemin ısı pompası performans katsayısını bütün deneyler için ortalama olarak sırası ile 2,9 ve 2,27 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca bütün deneyler için ortalama olarak dalgalı kanatçıklı havalı güneş kolektörünün verimini % 56,7 olarak hesaplamışlardır.

Kaygusuz (2000), seri bağlı güneş kolektörleri ile enerji depolu ısı pompası sistemlerinin Karadeniz Bölgesi'ndeki evlerin ısıtılması için kullanılabileceğini önermiştir.

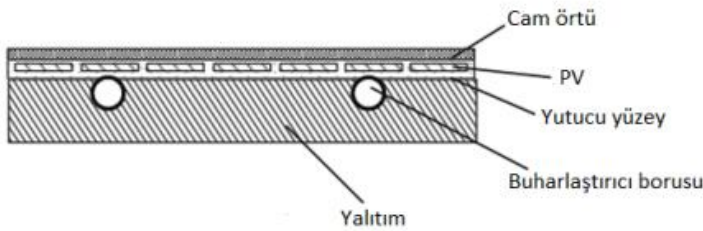
Çomaklı ve ark. (1993), Karadeniz Bölgesi'nde evsel ısıtma için enerji depolu güneş destekli ısı pompasının performansını incelemişlerdir. Isı pompası performans katsayısı (COP), kolektör verimi, sistemin COP'u ve depolama verimlerinin aritmetik ortalamaları sırası ile %4,5, %70, %4 ve %60 olarak hesaplamışlardır.

Xu ve ark. (2009), gerçekleştirdikleri çalışmalarında farklı bir IP-PV/T sistemini kuramsal açıdan araştırmışlardır. Sistemin şematik resmi Şekil 2.2’de verilmiştir.

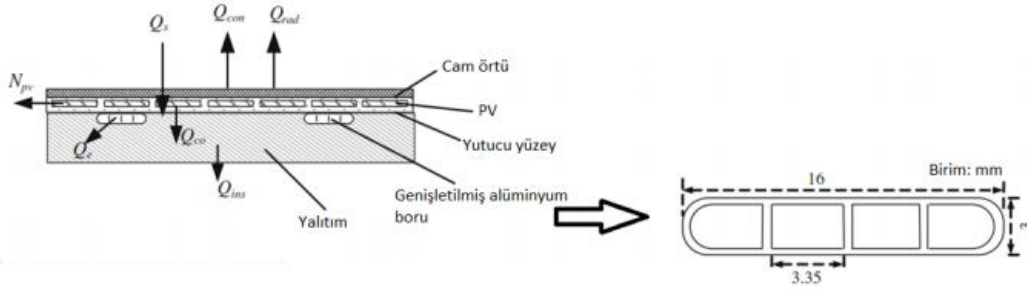


Şekil 2.2. Xu ve ark.'nın tasarladığı sistemin şematik gösterimi (Xu ve ark., 2009).

Bu sistemle hem elektrik üretimi hem de hacim ısıtma ve kullanım sıcak suyu elde edilmesi hedeflenmiştir. Geleneksel IP-PV/T sistemlerinde ısı pompasının buharlaştırıcı konumunda olan PV/T’lerin yapıları benzer olup, Şekil 2.3’te görüldüğü gibi bakır veya alüminyumdan yuvarlak olarak imal edilmiş borulardan oluşmaktadırlar. Xu ve arkadaşları bu çalışmalarında ısı pompasının buharlaştırıcısı konumunda olan PV/T’yi modifiye ederek Şekil 2.4’te görüldüğü üzere alüminyum borular genişletilmiş yassı bir biçime getirilmiştir. Xu ve arkadaşlarının bu çalışmalarındaki sonuçlar göstermiştir ki aynı şartlarda çalışan bilinen ve üzerinde değişiklik yapılmış IP-PV/T sistemlerinin karşılaştırılması yapıldığında, değişiklik yapılmış olan PV/T’nin kullanıldığı sistemin COP değerinin %7, ısıl randımanının %6 ve elektriksel verimin ise %2 daha çok olduğu tespit edilmiştir.



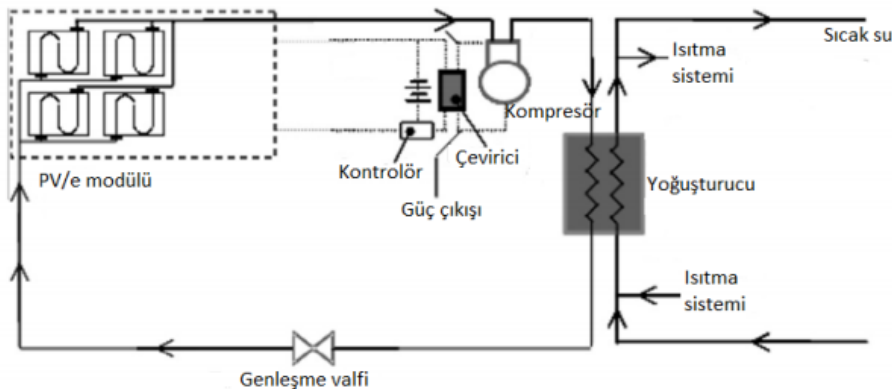
Şekil 2.3. Geleneksel IP-PV/T sistemlerinde buharlaştırıcı boruları (Xu ve ark., 2009).



Şekil 2.4. Modifiye edilmiş IP-PV/T sisteminin buharlaştırıcı boruları (Xu ve ark., 2009).

Hawladar ve ark. (2001), güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sistemi üzerinde çalışmışlardır. Bu sistemde soğutucu akışkan olarak R134a ve üzeri açık düz bir levha olan bir güneş kolektörü kullanılarak teorik ve deneysel analizler yapmışlardır. Singapur'un meteorolojik verileri kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde sistemin ortalama COP değerlerinin 4 ile 9 arasında ve kolektör verimlerinin ise %40 ile %75 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Zhao ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada ısı pompası ile birlikte çalışan bir PV sisteminin tasarımını yapıp sistemin teorik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu sistem ile hem elektrik enerjisi üretilmekte hem de ısı pompası vasıtası ile ısı üretimi gerçekleştirilmektedir. Sistemin şeması Şekil 2.5'te verilmiş olup şekilden de görüleceği üzere PV modülü ısı pompası sisteminin evaporatörü konumundadır. Sistemdeki ısı pompasının kapasitesi 5 kW olup soğutucu akışkan olarak R134a kullanılmıştır. Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan analizler neticesinde sistemin termal veriminin %55.58, elektriksel veriminin %19.03 ve sistemin toplam veriminin %70.14 olarak saptandığı belirtilmiştir.



Şekil 2.5. Zhao ve arkadaşları tarafından tasarlanan sistemin şeması (Zhao ve ark. 2011).

Fine ve ark. (2017), yaptıkları çalışmalarında su ısıtma amaçlı PV/T destekli kaskad ısı pompası sisteminin teorik termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları

Wang ve ark. (2018), konutlardaki enerji ihtiyaçlarının sağlanması amacıyla bir PV/T destekli ısı pompası sistemi tasarlayarak deneysel analizler yapmışlardır. Tasarlanan sistem, kış mevsiminde ısıtma, yaz mevsiminde soğutma ve tüm mevsimler boyunca da konutların elektrik ile sıcak su ihtiyaçlarının bir kısmını sağlayacak şekilde düşünülmüştür. Yapılan çalışmada Çin'in Pekin şehrinin iklim şartlarında ısıtma modunda PV/T destekli hava ve su kaynaklı ısı pompalarının performans katsayıları araştırılmış olup deneysel çalışmalar sonucu bu değerler sırası ile 3.18 ve 2.53 olarak tespit edilmiştir.

The diagram illustrates the flow paths in a cooling coil. On the left, a vertical rectangular section represents the coil's core. Red arrows labeled 'Hava Girişi' (Air Inlet) enter from the left, and blue arrows labeled 'Hava çıkışı' (Air Outlet) exit from the right. The core is filled with a grid of blue and red vertical bars. Labels at the top and bottom of the core indicate 'Sıcak su kanalları' (Hot water channels) and 'Soğutkan kanalları' (Coolant channels) respectively. A label 'Kanat' (Fins) points to the side of the core. On the right, a horizontal section shows the coil's layout. Red arrows labeled 'Su çıkışı' (Water Outlet) and 'Soğutkan girişi' (Coolant Inlet) enter from the top, and blue arrows labeled 'Su girişi' (Water Inlet) and 'Soğutkan çıkışı' (Coolant Outlet) enter from the bottom. The coil is shown as a series of horizontal tubes with vertical connections, forming a serpentine pattern.

Aynı şartlarda yapılan analizler sonucunda çift ısı kaynaklı çalışma şeklinin performansının tek ısı kaynaklı çalışma moduna göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde sistemin ortalama ısı ve elektriksel verimlerinin sırası ile %36.02 ile %14.50 oldukları hesaplanmıştır. Sistemin ortalama etkinlik katsayısı ise 3.07 dir.

3. GÜNEŞTEN ENERJİ ELDE EDİLMESİ

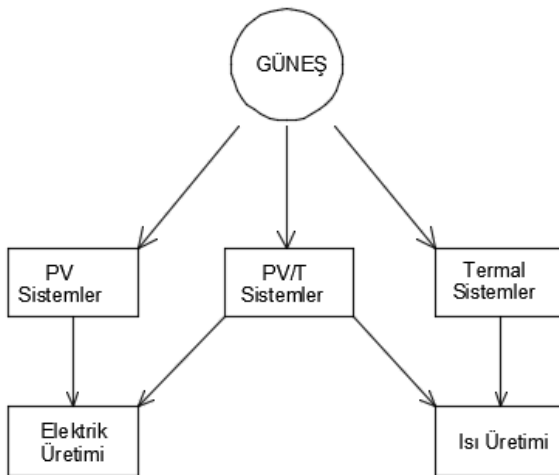
Güneş, güneş sistemindeki en eski orta yaşlı yıldızlardan olup bilim insanları tarafından yaşı yaklaşık olarak 4,5 milyar yıl olarak hesaplanmakta ve güneşin mevcut hidrojen rezervlerini 5 milyar yıl daha yakmayı sürdüreceği ardından yaklaşık 130 milyon yıl boyunca da helyum yakacağı düşünülmektedir (Saraçoğlu, 2022).

Güneş enerjisi; güneşin çekirdeğinden meydana gelen bir takım füzyon denklemleri ile açığa çıkan ışınlamalar sonucu oluşmaktadır. Çekirdekte meydana gelen tepkimeler bir atomun başka bir atoma dönüştüğü birkaç basamaklı reaksiyonlardır. Bu basamaklar neticesinde meydana gelen ürünlerin kütlesi, tepkimeye giren hidrojenlerin toplam kütlelerinden daha azdır. Kütledeki bu azalma;

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

denklemine göre enerjiye dönüşür. Güneşin çekirdeğinde meydana gelen bu tepkimeler ile her saniye takribi olarak 4.000.000 ton kütle enerjiye dönüşüyor. Toplam kütlesi yaklaşık olarak; 2×10^{30} kg olan güneşin takriben 5 milyar yıl daha bunun gibi enerji üreteceği düşünülüyor (Ocak, 2022).

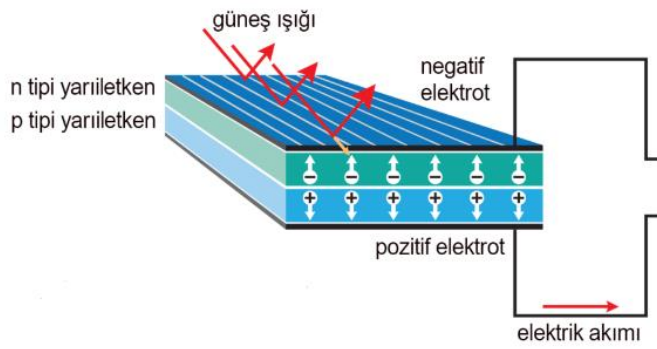
Günümüzde güneş enerjisinden farklı alanlarda ve farklı biçimlerde faydalanılmaktadır. Güneşten enerji elde etme temelde iki yolla sağlanabilir. Bunlardan biri fotovoltaik (PV) sistemler kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmesi iken diğeri ise ısı enerjisi elde edilmesidir. Ayrıca her iki yöntemin birlikte kullanılması ile yani Fotovoltaik/Thermal (PV/T) sistemleri kullanılarak elektrik ve ısı enerjilerini aynı anda elde edilebiliriz.



Şekil 3.1. Güneşten enerji elde etme yolları

3.1. PV (Fotovoltaik) Sistemler ve Özellikleri

Üzerlerine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemler PV (Fotovoltaik) sistemler olarak adlandırılır. PV sistemler, güneş ışınımından paneller vasıtası ile elektrik enerjisi üretilir ve bu enerjinin kullanımına olanak sunarlar. Güneş pili olarak da adlandırılan bu sistemler; birbirlerine bağlanmış hücrelerden oluşurlar. Fotovoltaik hücreler, temel olarak birbirine zıt kutuplara sahip iki yarı iletken yapının birleştirilmesi sonucu bir elektriksel alanın oluşturulması esasına dayalı yapılardır. (Şekil 3.2).

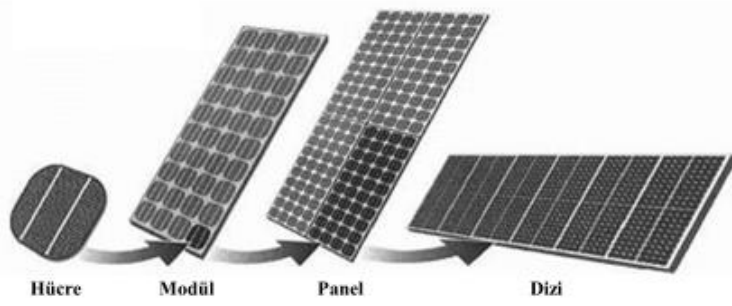


Şekil 3.2. Fotovoltaik hücre yapısı (Anonim)



Şekil 3.3. Fotovoltaik hücre (Anonim)

Bu akım neticesinde üretilen elektrik; doğrudan DC gücü ile çalışan cihazlarda, alternatif akıma (AC) dönüştürülerek AC gücü ile çalışan cihazlarda veya depolanarak kullanılabilir. PV hücreler; fotovoltaik sistemlerin en temel birimleri olup, seri veya paralel bağlanmak sureti ile bir araya gelerek PV modüllerini, modüller birleşerek panelleri, paneller birleşerek dizileri oluştururlar (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Fotovoltaik sistemleri oluşturan hücre, panel ve dizi (Özcan, 2020).

Bir PV hücresinde oluşan voltaj, kullanım açısından uygun olmayacak derecede düşüktür. Işınım yoğunluğu ve diğer parametrelere bağlı olmak ile birlikte 1 volttan daha azdır. Bu nedenle gerekli voltaj değerini ve gücünü elde edebilmek için PV hücreleri plastik veya cam bir levha üzerinde seri veya paralel bağlanmak sureti ile güç ve voltaj artışı sağlanır (Akay, 2022).

3.1.1. PV (fotovoltaik) hücre çeşitleri

İmalatlarında kullanılan malzemeye ve uygulanan üretim teknolojilerine göre PV hücrelerinin piyasada yaygın olarak tercih edilen çeşitleri; monokristal, polikristal ve ince film olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar. Bu PV hücrelerinin imalatlarında yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Bu yarı iletken malzemelere örnek olarak; silisyum (Si), galyum arsenit (GaAs) ve kadmiyum tellür (CdTe) verilebilir. Fotovoltaik teknolojilerde en yaygın kullanılan yarı iletken madde silisyum (Si) olup, kristalize şekilde PV hücrelerinde kullanılmaktadır. Kristal silisyum fotovoltaik hücreler, ilk olarak 1963 yılında Japonya’da üretilip ticarileştirilen güneş pilleri olup en önemli ham maddeleri silisyumdur.

Silisyumun elektriksel ve fiziksel özelliklerinin uzun zaman zarfında bozulmaması güneş pillerinde en popüler malzeme olarak yerini almasını sağlamıştır. Bununla birlikte silisyum, oksijenden sonra yeryüzünde en fazla bulunan malzeme olması yönü ile kaynak problemi olmayan yarı iletken olarak üretici firmaların tercih ettiği seçenek olup pazar payının %93’lük kısmını oluştururlar.

Silisyum yeryüzünde saf malzeme olarak bulunmaması nedeniyle, silisyum dioksit (SiO_2) ve diğer silikatlar sanayide kullanılmak üzere %98 ile %99 oranlarında çok kristalli silikona dönüştürülürler. Tek kristalli ve çok kristalli silisyum hücreler olmak üzere iki çeşit silisyum hücre vardır. Bunların arasındaki fark, kristal silikon hücrelerde bulunan

malzemenin, Czochralsi saflaştırma yöntemi sonrası sahip olduğu aralık düzeyine göre belirlenmektedir. Daha katkısız silisyum içeren güneş modülleri monokristal silisyum hücreleri olarak ortaya çıkmaktadır (Özcan, 2020).

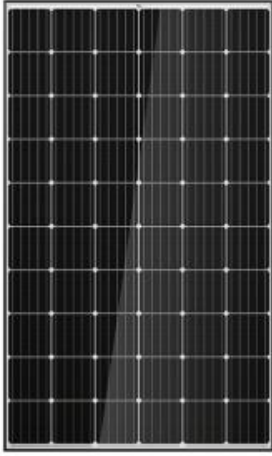
Üretimlerinde yüksek miktarda enerji sarf edilen tek kristalli silisyum (Si) hücrelerinde oluşan panellerin üretimleri daha yüksek maliyetli PV teknolojileridir (Özcan, 2020). Çok kristalli silisyum hücrelerinin elektrik üretim etkinlikleri, tek kristalli silisyum hücrelerinin elektrik üretim etkinliklerine nazaran daha düşüktür. Bu nedenle bu çalışmada monokristal PV paneller tercih edilmiştir.

Monokristal Fotovoltaik Hücreler, fotovoltaik sistemler için tek kristalli silikon hücreler, çok kristalli silikon hücelere nazaran daha verimlidirler. Çok kristalli yapıdaki silikon malzemeyi tek kristalli yapıya getirebilmek için en çok bilinen yöntemlerden Czochralsi saflaştırma yöntemi kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda saflaştırma işleminin gerçekleştirildiği bu yöntemle, 300 mm çapında tek kristalli silikon silindirler Wafer yöntemiyle 0,2 mm ile 0,3 mm kalınlık aralığında ince ince dilimlenirler. Isıl işlem neticesinde gerçekleştirilen dilimlemelerde büyük oranda malzeme kayıpları meydana gelir.



Şekil 3.5. Monokristal güneş hücresi (Anonim)

Monokristal silisyum güneş hücrelerinin yapılarına bakıldığında, hücrenin ön yüzeyi normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek adına konikler ve piramitler şeklinde tasarlanmıştır. Hücrenin yüzeyinde yansıtma özelliği bulunmayan 150 mm kalınlığında bir kaplama tabakası bulunmaktadır. Yansıtıcı özelliği olmayan tabakanın alt kısmında, hücrenin elektrik akımının ortaya çıktığı N-katmanı (n-tipi yarı iletken) ile P-katmanı (p-tipi yarı iletken) bulunur.

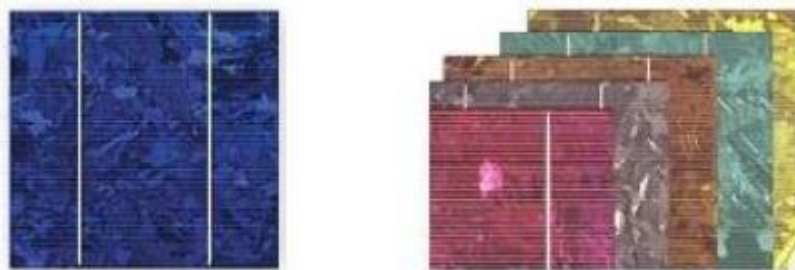


Şekil 3.6. Monokristal güneş paneli (Anonim).

Monokristal hücrenin oluşturduğu panellerin rengi diğer yöntemlerle üretilen panellerin renklerine göre daha koyudur. Sıcak havalarda daha verimli çalışan monokristal güneş panelleri; üretim süreçlerinin uzun, zahmetli ve malzeme israfının fazla olması nedenleri ile yüksek maliyetlidirler. Son zamanlarda sıklıkla tercih edilen monokristal güneş panelleri, en yüksek verimlilikteki güneş panel çeşidi olarak bilinmektedirler.

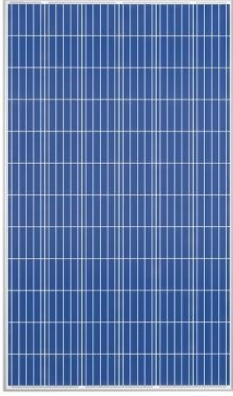
Polikristal Fotovoltaik Hücreler ise; monokristal silisyum hücrenin üretim yöntemine benzer şekilde üretilen polikristal silisyum hücrenin üretim yöntemi daha kolaydır. Daha çok tercih edilen üretim yöntemi dökme şeklindedir. Polikristal silisyum, eriyik halinde kalıplara dökülüp soğutularak elde edilir. Soğuyan yarı iletken genellikle dikdörtgen veya kare şeklinde dilimlenip daha sonra yarı iletken malzemelerle bir araya getirilerek bağlantıları yapılır.

Polikristal silisyumun üretiminde, monokristal silisyum üretimdeki gibi Czochralski yöntemi veya başka saflaştırma metodu kullanılmadığından oluşan polikristal silisyumlar homojen bir yapıda olmuyorlar. Bu nedenle polikristal güneş hücreleri kalite, randıman ve maliyet fiyatları bakımından monokristal güneş hücrelerine göre daha düşüktürler.



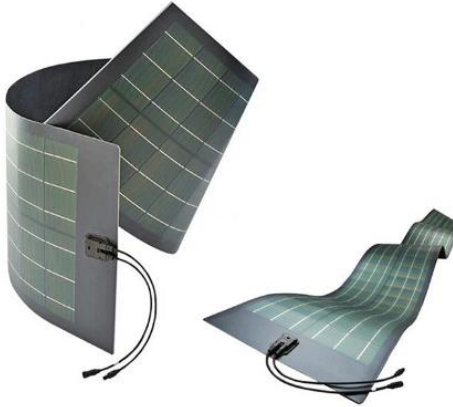
Şekil 3.7. Polikristal güneş hücresi (Aras, 2019).

Polikristal güneş panellerinde yansımayı engelleyici cam varsa renkleri mavi olarak görünmektedirler ancak yansımayı önleyici cam yok ise renkleri gümüş rengindedirler. Monokristal güneş pillerine göre kullanım alanları daha yaygın olup bunun en önemli nedeni ise daha kolay ulaşılabilir ve daha düşük maliyetli olmalarıdır. Dolayısı ile monokristal pillere nazaran fayda/maliyet oranları yüksektir (Pathak ve ark., 2014).



Şekil 3.8. Polikristal güneş paneli (URL-1, 2023).

İnce film Fotovoltaik hücreleri ise, ışığı yutma özelliği yüksek olan maddeler kullanılarak üretilen ince film fotovoltaik güneş hücreleri yarı iletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine kaplanmasıyla oluşturulmaktadır. İnce film hücrelerin üretiminde kullanılan yarı iletken malzemelerin büyüklükleri; bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine kadar değişebilen damarlardan oluşmaktadır. Bu nedenle ince film hücreleri oldukça esnek bir yapıya sahiptirler (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. İnce film güneş paneli (URL-2, 2023)

İnce film hücrelerinde çoğunlukla; amorf silisyum, kadmiyum ve tellür elementlerinden meydana gelen bileşikler kullanılmaktadır. İnce film güneş hücrelerinde yüksek güneş ışınları soğurma oranlarına karşın çıkış akımları oldukça düşüktür. Bu nedenle çıkış voltajları kristal silisyum hücrelerine göre 2-3 kat daha fazla iken çıkış akımları bir o

kadar düşüktür. İnce film malzemelerin modül ve panel yapımında kullanımları daha kolay ve uygun iken, verimleri %5 ile %8 aralığında değişkenlik göstermektedir. İnce film hücrelerin ışığı absorbe etme oranları ile ısıya karşı dayanıklılık dirençleri oldukça yüksektir. Düşük verimlilikleri nedeni ile Pazar payının küçük bir bölümünü oluştururlar. Ancak ince film güneş hücrelerini üretebilmek için gerekli olan oluşum enerjisi, kristal yapılu güneş hücreleri için gerekli olan oluşum enerjisinden daha düşüktür. Dolayısıyla üretim maliyetleri de kristal yapılu güneş hücrelerine göre daha düşüktür. Tablo 3.1’de güneş hücreleri oluşum enerjileri bakımından karşılaştırılmışlardır.

Tablo 3.1. PV güneş hücrelerinin oluşum enerjileri (Gemicioğlu, 2011).

GÜNEŞ ÜCRETİ TÜRÜ	ENERJİ MJ/m ²	KARBON kg CO ₂ /m ²
Monokristal Silisyum	4750	242
Polikristal Silisyum	4070	208
İnce Film	1305	67

Düşük maliyetli olmalarına rağmen aynı güçteki diğer güneş hücrelerinin kapasitelerine tekabül edecek bir sistem için daha geniş bir alana kurulum yapılması gerekmektedir. Dolayısı ile alan sorununun olmadığı durumlarda kullanılmaları tercih edilmektedir. İnce film fotovoltaik hücreler maliyet/performans bakımından incelendiğinde kristal silisyum hücrelere göre daha iyi konumda oldukları görülecektir. Örneğin kristal silisyum malzemeden üretilen güneş hücrelerinin sıcaklıkla etkinliklerinde düşüş olurken, ince film güneş hücrelerinde bu verimlilik düşüşü daha az seviyelerde kalmaktadır.

İnce film fotovoltaik hücre teknolojisi, uzay ve uydu incelemelerinde çok fazla tercih edilmektedir. Bunun temel nedeni; ince film güneş pillerinin atmosfer şartları dışındaki verimliliklerinin %30'lara kadar varmasıdır (Özcan, 2020).

İnce film fotovoltaikler; amorf silikon ince film fotovoltaikler, galyum arsenit (GaAs) ince film fotovoltaikler, kadmiyum tellür (CdTe) ince film fotovoltaikler ve bakır indiyum galyum selenit (CIGS) ince film fotovoltaikler olarak sıralanabilirler. Günümüz fotovoltaik teknolojisinin geldiği noktada, PV modüllerin avantajlı veya dezavantajlı yönleri farklılık gösterdiği için potansiyel verimlilikleri ile fiyatları karşılaştırılarak herhangi bir PV sisteminin kurulumu için en optimum seçenek olarak tek bir PV teknolojisini belirlemek zordur. (Obeng ve ark., 2020). Monokristal sistemlerin hem modül seviyesi hem de sistem seviyesi watt başına maliyeti arttırdığından, bu teknolojiler düşük hacimli üretim sistemleri

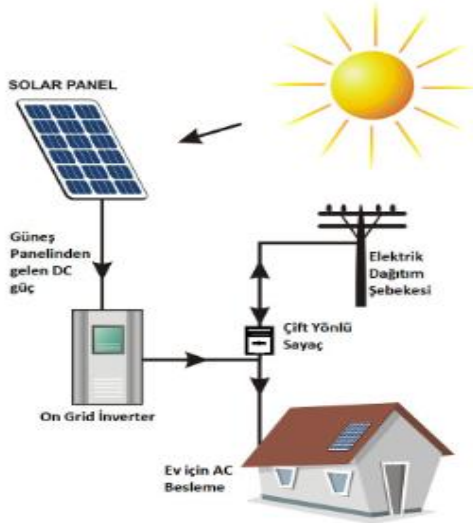
için uygundur. Ancak geniş alan modülleri, modül ve sistem aşamalarında kayda değer iktisat sağlama potansiyellerine haizdir. Buna özellikle ince film teknolojileri örnek verilebilir. Uygun fotovoltaik hücre yapısının seçimi; arazi koşulları ile sistemin karşı karşıya kalacağı olası sorunlara bağlıdır. Aşağıdaki Tablo 3.2’de farklı fotovoltaik hücrelerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 3.2. Farklı fotovoltaik teknolojilerin avantaj ve dezavantajları (Şensoy, 2019)

PV HÜCRE ADI	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Monokristal Hücre	• %15-%22 arası verimlilik değeri • Kw başına gerekli alan (m²): 7 m² • Kullanım ömrü takriben 25 yıl	• Daha maliyetli olması • Sıcaklık atışı ile verim düşüşü • Kir ve gölgeye karşı hassasiyet
Polikristal Hücre	• Üretim maliyeti düşük ve kolay • Yüksek sıcaklığa daha toleranslı • Kullanım ömrü takriben 20 yıl	• %14-%17 arası verimlilik değeri • Kw başına gerekli alan (m²): 8 m²
İnce Film Hücre	• Düşük maliyet ve basit üretim • Yüksek sıcaklık ve gölgelenemeye karşı yüksek tolerans • Esnek yapısı sayesinde kolay ve farklı kurulum avantajları	• %6-%13 arası verimlilik değeri • Kw başına gerekli alan (m²): 10-15 m² • Yüksek bozunma oranı

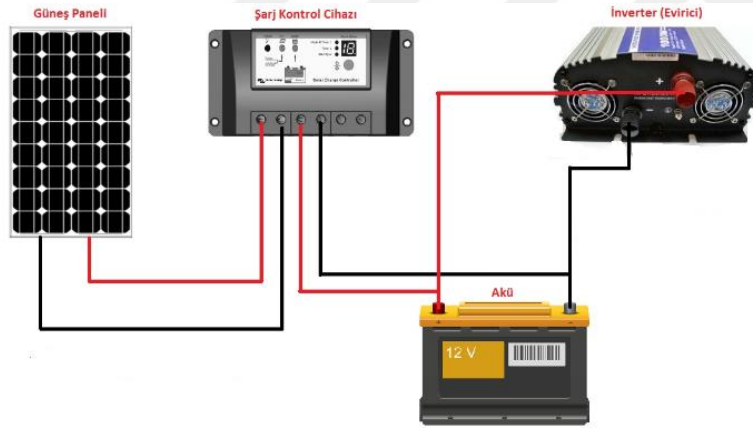
3.1.2. PV (fotovoltaik) sistem çeşitleri

Sistemin ana bileşenlerinden olan paneller üzerlerine düşen güneş ışığını soğurarak DC akımlı elektrik enerjisine çevirirler. PV panellerin veya dizilerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan PV sistemlerinde üretilen elektrik enerjisi doğru akım (DC) olarak kullanılabilir, depolanabilir veya inverter yardımı ile alternatif akıma (AC) dönüştürülerek alternatif akım sistemlerinde kullanılabilir. Şebekeye bağlı sistemler ürettiği elektrik enerjisini, anlık olarak iç tüketimde kullanıp ve fazladan üretilen elektrik enerjisini ise şebeke hattına iletmektedirler (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Şebekeye bağlı (on grid) PV sistemin şematik gösterimi (Anonim).

Şebekeden bağımsız (off grid) sistemlerde ise panellerde üretilen elektrik enerjisi aküler aracılığı ile depolanmakta ve ihtiyaç anında enerji ihtiyacı akülerden sağlanmaktadır. Şekil 3.11’de şebekeden bağımsız PV sisteminin şematik gösterimde de görüleceği üzere şebeke hattının yerini akü almaktadır.



Şekil 3.11. Şebekeden bağımsız (off grid) PV sistem şeması (URL-3, 2023).

Daha çok şebekenin bulunmadığı mahallerde öncelik verilen off grid sistemler, on grid sistemlere göre akü bedeli sebebiyle yüksek kurulum bedellerine mal olmaktadır. Ayrıca akü ömürlerinin sınırlı olmasından ötürü mecburi kalınmadıkça off grid sistemlerin tercih edilmesi daha ekonomik olabilmektedir. Bu çalışmada da şebekeden uzak yerde yapı inşa edilmesi nedeni ile off grid sistem kullanılmıştır.

3.1.2.1. PV (fotovoltaik) sistemleri meydana getiren unsurlar

Bir PV sistemini oluşturmak için bazı paneller bir araya getirilerek bunlara ilave malzemelerde kullanmak gerekmektedir. Bu malzemelerin her biri PV sistemi unsurlarını oluşturmaktadırlar. Klasik bir PV sisteminin unsurları aşağıda açıklanmıştır.

- ✓ **Paneller:** PV hücrelerin bir araya gelerek oluşturduğu modül serilerinden meydana gelen paneller; PV sistemin temel unsurlarından biri olup üzerlerine gelen güneş ışığını soğurarak elektrik akımına çevirirler. Panellerde üretilen akım doğru akım (DC) olup sistemde bulunan eviriciler sayesinde alternatif akıma (AC) dönüştürülerek evsel aletlerde kullanılır.
- ✓ **Evirici (İnverter):** İnverter olarak da bilinen eviriciler; PV sistemlerde akülerden gelen doğru (DC) akımı, şebeke akımı olan alternatif (AC) akıma dönüştüren elektriksel güç dönüştürme elemanlarıdır. İnverterler; sistemlerdeki dalgalanmaları, kesintileri, kararsızlıkları önleyip sistemlerin daha fonksiyonel hale getirmektedirler. İnverterler vasıtasıyla 12V, 24V ve 48V olan DC akımı 220V AC akıma çevrilir.
- ✓ **Akü (Batarya):** Dünyanın kendi eksenini etrafındaki hareketi nedeni ile güneş enerjisinden günün 24 saati boyunca faydalanmak imkânsızdır. Bu nedenle güneşin olduğu saatlerde elde edilen enerjiyi güneşin olmadığı saatlerde (genellikle gece) kullanmak üzere depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik akımının biriktirildiği bu üniteler akülerdir. Aküler şebekeden bağımsız (off grid) sistemlerden kullanılmakta olup bu sistemleri on grid sistemlerden fiyat yönü ile daha maliyetli kılarlar. Jel aküler tamamen bakım gerektirmeyen aküler olduklarından off grid PV sistemleri için oldukça uygun bataryalardır (İnanç, 2020).
- ✓ **Şarj Kontrol Ünitesi:** PV sistemlerde enerjiyi depolamak amacıyla kullanılan akülerin, aşırı şarj veya deşarj olması sonucu zarar görmelerini önlemek amacıyla kullanılan kontrol birimidir. Bu birim sayesinde aküler daha az zarar görmekte dolayısı ile akülerin kullanım ömürleri uzamaktadır.
- ✓ **Sayaçlar:** Üretilen elektrik enerjisi değerini veya şebeke hattına iletilen enerji değerlerini ölçmek için kullanılan birimdir. Çoğunlukla şebekeye bağlı (On grid) sistemlerde kullanılmakta olup çift yönlü ve tek yönlü sayaç çeşitleri vardır.
- ✓ **Diğer Elemanlar:** PV sistemlerini aktif etmek için diyotlar, bağlantı kesme elemanları, aşırı akımdan koruma elemanları, sigortalar ve montaj elemanları gibi elemanlar kullanılmaktadır.

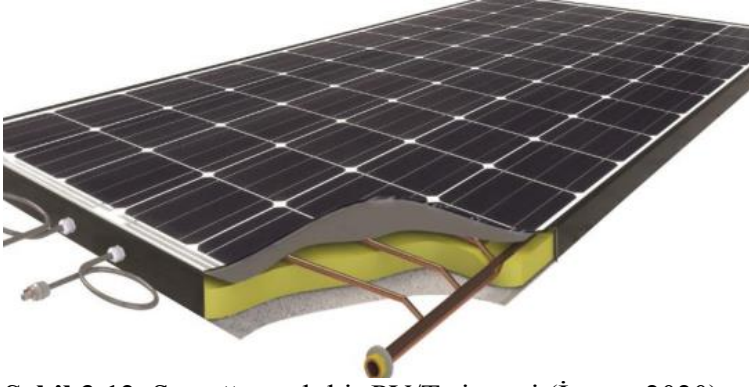
3.1.2.2. PV/T (fotovoltaik/termal) sistemler ve özellikleri

PV panellerin elektriksel verimlilikleri nominal çalışma şartlarında (20 °C sıcaklığında 0,8 kW/m² güneş radyasyonunda ve 1m/s rüzgâr hızında) %6 ile %18 aralığında değişkenlik göstermektedir (Zhang ve ark., 2014). Ancak normal çalışma koşullarında gün içerisinde PV panellerin sıcaklıkları git gide artış göstermektedir. PV panellerindeki her 1°C'lik sıcaklık artışı kristal silisyum panellerinin elektriksel verimliliklerinde %0,4-0,5 kadar ve amorf silisyum panellerinin elektriksel verimliliklerinde %0,25 oranında azalmaya neden olmaktadır (Zhang ve ark., 2014). Katkar ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, PV güneş panellerindeki sıcaklık artışının, güneş pili hücrelerinde üretilen akımı kayda değer nispette azalttığını belirtmişlerdir. PV sistemlerin normal çalışma koşullarında sıcaklıklarının artması ve buna bağlı olarak verimliliklerinin düşmesini engellemek amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda temel amaç PV sistemlerin soğutularak çalışma sıcaklıklarının olabildiğince düşük kalmasını sağlayarak elektriksel verimliliklerinin düşmesini engellemektir.

PV/T sistemler kullandıkları soğutucu akışkana göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler.

- ✓ Su soğutmalı PV/T sistemler,
- ✓ Hava soğutmalı PV/T sistemler,
- ✓ Isı pompası destekli PV/T (soğutucu akışkanlı) sistemler
- ✓ Isı borulu PV/T sistemleri

Su soğutmalı PV/T Sistemler, PV/T içerisinde soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı ve PV modüllerin ısısının suya aktarıldığı sistemlerdir. Havaya oranla yoğunluk, özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenlik gibi yüksek termofiziksel özelliklere sahip olması bakımından PV/T sistemlerinde soğutucu akışkan olarak su ön plana çıkmıştır. Kızılkın'a (2017) göre, güneş panellerinin su ile soğutulmasının daha verimli ve kullanışlı olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan uygulamalardan, su ile soğutma tekniği enerji verimliliğini artırmasının yanı sıra fotovoltaik panellerin kullanım ömrünü de arttırdığı gözlenmiştir. Güneş panellerinin ön yüzeylerinin soğutulduğu soğutma tekniğinde, yüzeydeki su filmi sayesinde güneş ışınlarının panel yüzeyine erişiminin kısmen engellenmesinin yanı sıra görüntü kirliliği de oluşturmaktadır.



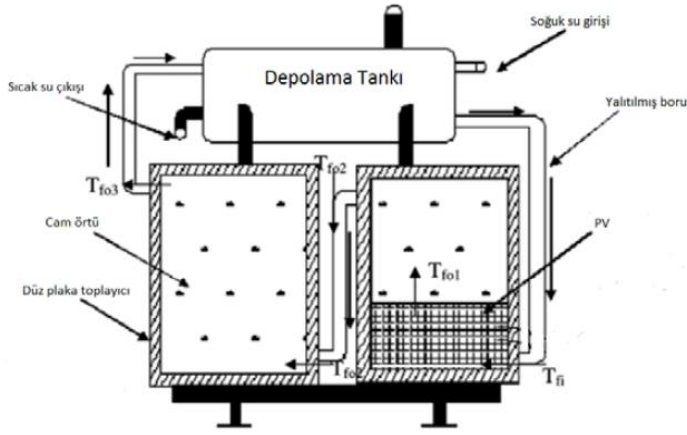
Şekil 3.12. Su soğutmalı bir PV/T sistemi (İnanç, 2020).

Su soğutmalı PV/T sistemleri her ne kadar Şekil 3.12’de gösterildiği gibi panel arkasından kapalı bir su soğutma sistemine sahip olarak bilinse de ön yüzeyden su soğutmalı deneysel çalışmalarda yapılmıştır.

Su soğutmalı PV/T sistemlerin performansları; PV hücre yapısı, su akış kanalının geometrisi ve boyutları, su akış sıcaklık ve hızı, dış ortam şartlarına göre değişkenlik gösteren elektriksel ve ısı verimleri ile hesaplanır (Ezcan, 2019). Literatürde su soğutmalı PV/T sistemlerden incelenen birkaç çalışma aşağıda verilmiştir.

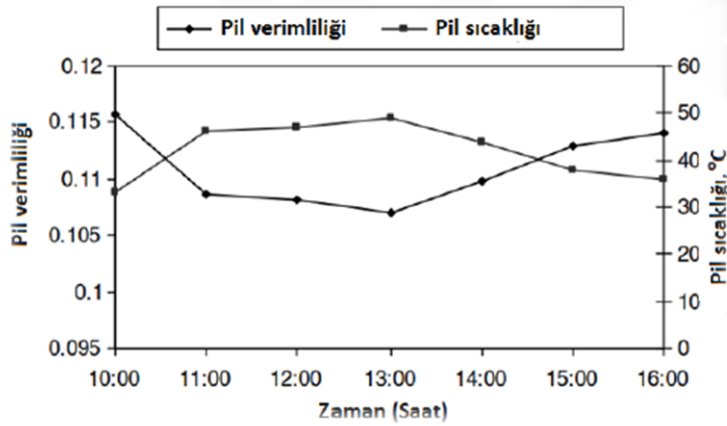
Kabul ve Duran (2014), yaptıkları çalışmada soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile panel yüzeylerindeki sıcaklık mümkün mertebede düşük tutulmaya çalışılarak elektriksel verimdeki kayıpların engellenmesinin yanı sıra sistemden sıcak su elde etme hedeflenmiştir. Çalışmada soğutucu akışkanın kullanıldığı ve kullanılmadığı iki ayrı panel kullanılmıştır. İçine soğutma suyu geçirilen panelde iki farklı su debisi ve panel açısı durumları denenmiştir. Bu panelde sırası ile 0,16 kg/s ve 0,33kg/s debilerde su akıtılarak soğutma yapılırken, panel açısı da sırası ile 37° e 33° olarak denenmiştir. Deney sonuçları soğutmasız ve soğutmalı olarak karşılaştırılmış, bunun neticesinde elektrik üretiminde %35’lik bir güç artışı ve %7’lik bir verim artışı elde edilmiştir.

Dubey ve Tiwari (2008), yaptıkları çalışmada güneş enerjisinden hem elektrik hem de su ısıtılması yolu ile ısı enerjisi elde etmeyi hedeflemişlerdir. Tasarladıkları deney düzeneğinde (Şekil 3.13) PV panellerden elektrik üretilirken aynı zamanda da güneş kolektöründen su verilerek sıcak su sağlanmaktadır.



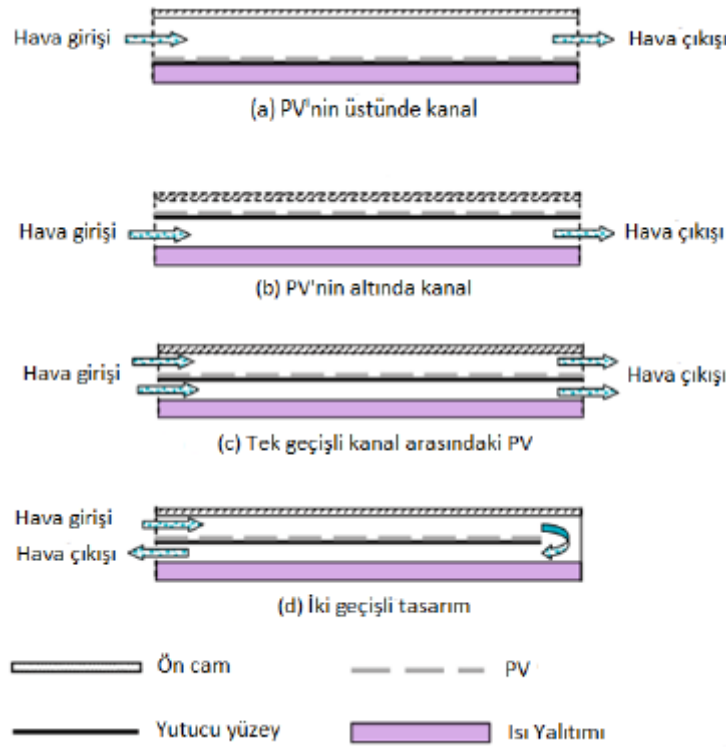
Şekil 3.13. Su soğutmalı PV/T sistemin deney düzeneği (Dubey, Tiwari 2008).

Sıcak su elde edilirken panellerin çalışma sıcaklığının düşük olması verimi artırır. Şekil 3.14'te PV'lerin sıcaklık verim ilişkileri verilmiştir.



Şekil 3.14. PV'lerin zamana bağlı sıcaklık ve verim grafiği (Dubey, Tiwari 2008).

Yapılan analizler neticesinde teorik ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Hava soğutmalı PV/T Sistemler ise, isminden de anlaşıldığı üzere havanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı ve PV modüllerin ısısının havaya aktarıldığı sistemlerdir. Şekil 3.15'te farklı hava geçiş konum ve sayılarındaki PV/T tasarımlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 3.15. Farklı hava soğutmalı PV/T tasarımları (Chow, 2010).

PV/T'lerde soğutucu akışkan olarak havanın kullanılmasının avantaj ve dezavantajları vardır. Herhangi bir sızıntı veya kaçak durumunda problem olmaması, kaynama ve donma riskinin bulunmaması PV sistemlerinin soğutulmasında hava kullanılmasının avantajlarındanıdır. Isı iletkenlik katsayısının düşük oluşu ve düşük ısı kapasitesine sahip olması gibi özellikleri nedeni ile hava PV/T sistemlerinde soğutucu akışkan olarak dezavantajlı duruma düşmektedir. Literatürde havanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan birkaçına aşağıda yer verilmiştir.

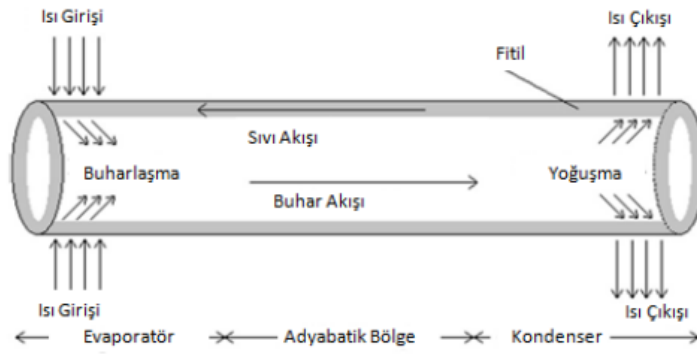
Hariri (2022), yaptığı deneysel çalışmada PV sistemlerine fan destekli hava akımı ile cebri soğutma uygulamıştır. Deneyde bir adet PV(soğutmasız) , bir adet PV/T1 (eğimli kanatçıklı) ve bir adet PV/T2 (düz kanatçıklı) sistem kullanmıştır. PV'yi referans sistem olarak kullanıp; arka yüzey sıcaklıkları, termal güçler, elektriksel güçler ve verimlilikler açısından PV/T1 ve PV/T2 sistemleri ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, PV/T1 ve PV/T2 kolektörleri, PV modülüne göre %12,29 ve %21,97 daha fazla soğutulmuştur. PV/T1 ve PV/T2'nin her biri için elektrik verimliliği %5,12 ve %6,08 iken, PV modülü için %4,37 olarak hesaplanmıştır. PV/T1 ve PV/T2 kolektörler için genel verimlilikler %43,74 ve %62,3

olarak tespit edilmiştir. Ekserji verim değerleri PV modülü için %4,68, PV/T1 ve PV/T2 kolektörleri için %5,65 ve %6,8 olarak hesaplanmıştır.

Isı pompası destekli PV/T sistemler ise, içerisinde soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı PV/T sistemlerinde suyun giderek ısınması ve sistemin çalışma sıcaklığının yükselmesi, ayrıca soğuk iklimlerde suyun donma riskinin bulunması gibi dezavantajlı durumların olması nedeniyle farklı soğutucu akışkanların PV/T sistemlerinde kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Su harici soğutucu akışkanların kullanımı için ise ısı pompalı PV/T (IP-PV/T) sistemler geliştirilmiştir. Bu tip sistemlerde, su dışında soğutucu akışkanlar kullanılması sayesinde soğuk iklim şartlarında meydana gelebilecek donma riski ortadan kaldırılabilmektedir. Bununla birlikte PV/T sisteminin çalışma sıcaklığının düşük seviyelerde kalması sağlanabilmektedir. Literatürde bulunan bazı IP-PV/T sistemlerine örneklere bu çalışmanın 2. bölümü olan Literatür taramasında detaylı olarak yer verilmiştir.

Isı borulu PV/T sistemler ise, IP-PV/T sistemlerinin kullanılmaya başlanması ile birlikte su ve hava soğutmalı PV/T sistemlerindeki dezavantajlı durumlar ortadan kaldırılmış olmasına rağmen bu sistemlerde soğutucu akışkanların sızıntı yapma gibi olumsuz yönleri söz konusudur. Örneğin soğuk iklim bölgelerinde su kullanılan PV/T sistemleri uygun değildir. Çünkü suyun düşük sıcaklıkta donması ile birlikte hacminde meydana gelen artış nedeni ile sisteme zarar vermesi kaçınılmazdır. Bu gibi olumsuzlukların giderilmesi adına son yıllarda IB-PV/T (Isı borulu fotovoltaiik/termal) sistemler geliştirilmiştir.

Isı boruları ısıyı bir noktadan diğer bir noktaya taşıyan cihazlardır. Bu cihazlarda ısı transferi; sırası ile buharlaşma ve yoğunlaşma prosesleri ile gerçekleştirilir. Bu yöntemle yüksek miktardaki ısı dışardan ekstra bir güç girdisine ihtiyaç duyulmaksızın ve neredeyse adyabatik bir şekilde aktarılabilmektedir. Isı boruları temelde evaporatör, kondenser ve adyabatik kısım olmak üzere üç temel bölümden oluşurlar (Şekil 3.16). Evaporatörde dış ortamdan alınan ısı neticesinde buharlaşan iş akışkanı, meydana gelen buhar basıncı ile önce adyabatik kısma daha sonra kondensere doğru ilerler. Kondenserde ısınıp dış ortam veya akışkana bırakarak yoğunlaşır. Yoğunlaşma işlemi neticesinde sıvı fazına dönüşen iş akışkanı yerçekimi etkisiyle tekrar adyabatik kısma ardından da evaporatöre ulaşarak döngüsünü tamamlar.



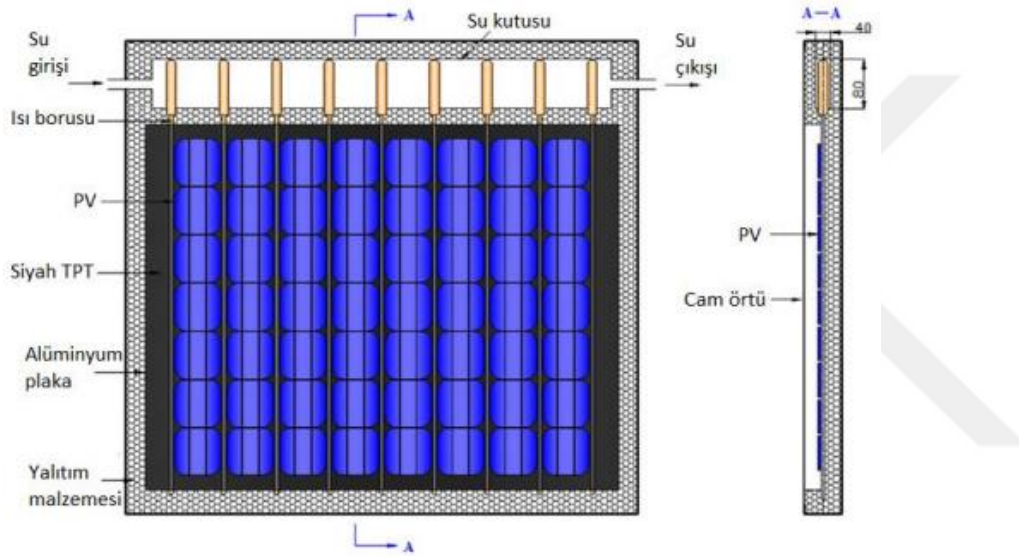
Şekil 3.16. Temel ısı borusunun şematik gösterimi (Chan ve ark., 2015).

Uyar ve Najafi'ye (2020) göre ısı boruları, termal iletkenliği ve fazlar arası geçiş mekanizmasını bütünleştirdiği için ısı transferi bakımından oldukça verimlidirler. Isı borulu PV/T sistemlerinde fotovoltaik panellerin hemen altında düz tabakalı ısı boruları bulunmaktadır. İçinde çok sayıda mikro kanal dizisine sahip ısı borularının paneller ile temas halinde olan kısımları buharlaştırıcı bölümünü oluşturmaktadır. Burada sıvı fazından gaz fazına geçen soğutucu akışkan panellerin ısını çekerek çalışma verimlerini artırır. Boruların diğer uçtaki kısımları ise yoğunlaştırıcı kısmı oluşturmaktadır. Bu kısımda ise soğutucu akışkan üzerindeki ısıyı ısı değiştiricileri üzerinden soğutma suyuna aktararak gaz formundan sıvı forma dönüşmektedir. Böylece fotovoltaik paneller ile ısı değiştiricileri arasında çok etkili bir ısı transfer mekanizması ve düşük bir termal direnç oluşumu sağlanmaktadır. Dolayısıyla ısı borulu PV/T sistemlerinin verimlerinde önemli derecede artış sağlanmaktadır. Literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Wu ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada IB-PV/T (Isı borulu fotovoltaik/termal) bir sistemin teorik analizi gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.17'de bu sistemin şematik gösterimi verilmiştir.

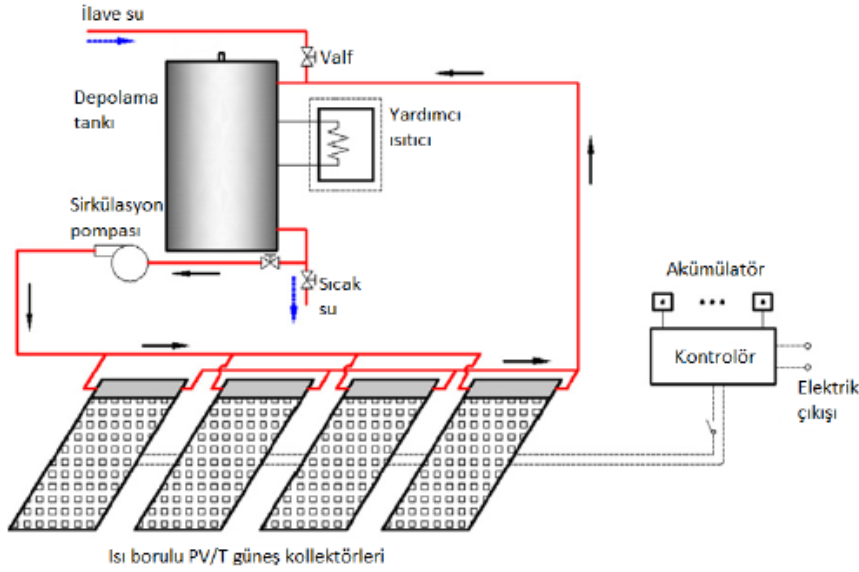
giriş sıcaklığının ve debisinin; PV modüllerin sıcaklıkları, termal, elektriksel ve ekserji verimleri ile üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda sistemin toplam termal veriminin %63.65, elektriksel veriminin %8.45 olduğu ve ekserji veriminin ise %10.26 olduğu hesaplanmıştır.

Gang ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada ısı borulu fotovoltaiik/termal (IB-PV/T) sistemin simülasyon çalışması neticesinde Çin'in üç farklı kentinde yıllık elde edilen ısı ve elektrik enerjisi miktarlarını hesaplamışlardır. Yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip IB-PV/T ile yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip olmayan IB-PV/T sistem olmak üzere iki farklı IB-PV/T sistemi incelemişlerdir. Şekil 3.18'de IB-PV/T sistemin kolektör yapısı verilmiştir.



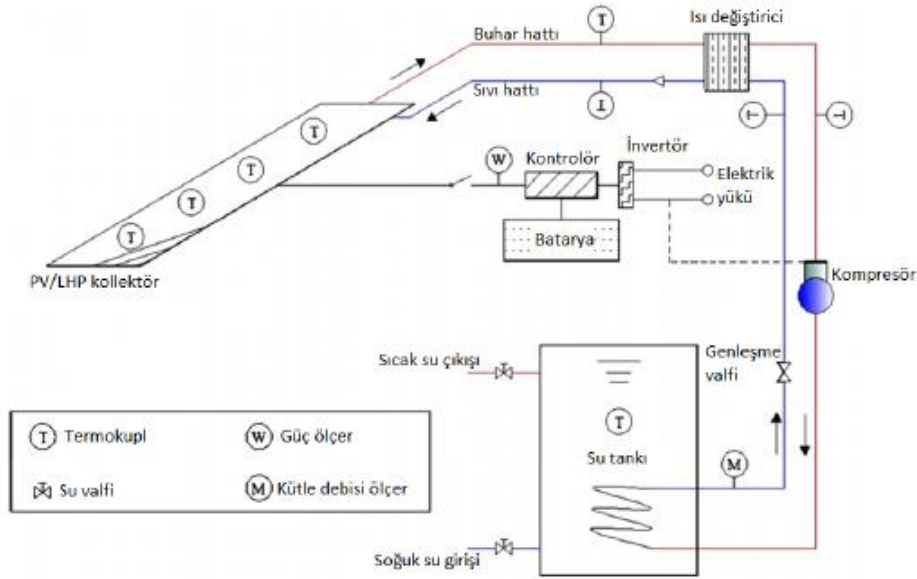
Şekil 3.18. Gang ve arkadaşlarınca tasarlanan kolektör sistemi (Gang ve ark., 2012).

Şekil 3.18'de de görüldüğü gibi ısı borusunun buharlaştırıcı kısmı alüminyum plaka üzerine, yoğunlaştırıcı kısmı ise suyun geçtiği kutu içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.17'de ise yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip IB-PV/T sistemin şematik görüntüsü verilmiştir. Sistem; depolama tankı, sirkülasyon pompası, gazlı yardımcı ısıtıcı ve IB-PV/T kolektöründen oluşmaktadır. Simülasyon çalışmaları depolama tankı kapasitesinin 250, 300, 350 ve 400 litre olacak şekilde seçilip gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modeli ile yapılan çalışmalar neticesinde düşük depolama kapasiteli olan sistemlerde daha düşük ısı enerjisi elde edildiği, PV/T panellerden elde edilen elektrik enerjisinin ise sistemin su depolama kapasitesinden bağımsız olduğu anlaşılmıştır. Gang ve ark., (2012), tarafından dizayn edilen ısı borulu fotovoltaiik/termal sistemin şematik gösterimi Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Gang ve ark.'na tasarlanan IB-PV/T sisteminin şeması (Gang ve ark., 2012).

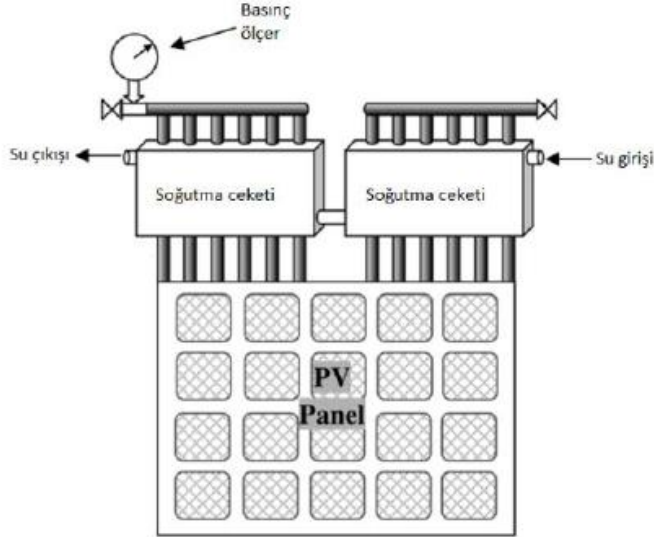
Zhang ve ark. (2013), araştırmalarında sıcak su temini için farklı bir Fotovoltaik/Döngü-Isı Borulu (PV/DIB) ısı pompası sistemini kuramsal ve ampirik analizini gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.20'de şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Zhang ve ark.'na tasarlanan ısı pompası sistemi (Zhang ve ark., 2013).

Bu sistemde kullanılan ısı borusu bakırdan imal edilmiş olup içinde %95 oranında su ve %5 oranında glikol kullanılmıştır. Sistem ısı pompası kısmında ise soğutucu akışkan olarak R134a kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elektriksel %10, termal %40 ve toplamda verimin %50 dolaylarında olduğu, sistemin performans katsayısının (COP) ise 8.7 olduğu görülmüştür.

Moradgholi ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada ise ısı borulu PV/T sistemin deneysel araştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Araştırma ilkbahar ve yaz aylarında sırası ile 30°'lik ve 40°'lik açılar ile yerleştirilmiş sistemlerde metil alkol ve aseton kullanılmıştır. Sistemin şematik görünümü Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Moradgholi ve ark.'nın tasarladığı PV/T sisteminin şeması (Moradgholi ve ark., 2014).

İlkbahar mevsiminde yapılan deneyler boyunca PV/T'nin, PV'ye göre yaklaşık %0.72 daha fazla elektrik enerjisi sağladığı saptanmıştır. Bunun yanında PV/T sistemin termal veriminin ortalama olarak PV sistemin termal veriminden %15.3 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yaz koşullarında gerçekleştirilen deneyler neticesinde ise ortalama %0.88 daha fazla elektrik enerjisi sağladığı ve sistemin termal verimlilik açısından PV'ye göre yaklaşık %44.38 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 3.3. Farklı PV/T sistemlerin avantaj ve dezavantajları (Ezcan, 2019).

PV/T TİPİ	ORTALAMA VERİM (%)	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Hava soğutmalı	24-47	- Düşük Maliyet - Basit Yapı	- Düşük Termal Kütle - Yüksek Hava Hacmi - Etkili Olmayan Isı Giderme - Yüksek Isı Kaybı - Buna Rağmen Yüksek PV Çalışma Sıcaklığı - Stabil Olmayan Isı Giderme
Su Soğutmalı	33-59	- Düşük Maliyet - Direk Katkı Sağlaması - Yüksek Termal Kütle - Düşük Akış Hacmi	- Karışık Yapı - Borularda Olası Donma Tehlikesi
Soğutucu Akışkanlı	56-75	- Düşük PV Sıcaklığı - Kararlı Performans - Yüksek Verimlilik - Etkili Isı Giderme	- Akışkan Sızdırma Riski - Dengeli Olmayan Sıvı Dağılımı - Yüksek Maliyet - İşletme Zorluğu
Isı Borulu	42-68	- Düşük PV Sıcaklığı - Kararlı Performans - Yüksek Verimlilik - Yüksek Termal Kütle - Düşük Güç Gereksinimi	- Yüksek Maliyet - Hassas Yapı ve Yüksek Risk - Karışık Yapı

3.2. Termal Sistemler ve Özellikleri

Güneş enerjisinden faydalanmanın birçok yöntemi olması ile birlikte bu yöntemler içinde en gelişmiş, olgunlaşmış olanı ve yaygın olarak kullanılanı ısı uygulamalarıdır. Bu uygulamaların temel olarak çalışma prensibi güneş enerjisini termal enerjiye çevirmeleridir. Buradan elde edilen ısı enerji; ısıtma uygulamaları, soğutma uygulamaları, elektrik üretimi, buhar üretimi, su arıtma sistemleri, gıda ve endüstriyel kurutma, pişirme gibi birçok alanda farklı biçimlerde kullanılabilir. Güneşten elde edilen ısı enerjisi doğrudan kullanılabilir gibi farklı sistemlere entegre edilerek enerjinin başka formları olarak da kullanılabilir.

Güneş enerjisi ısı teknoloji uygulamaları elde edilen sıcaklık değerlerine göre düşük sıcaklık uygulamaları ve yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

3.2.1. Düşük sıcaklık uygulamaları

Camlı düzlemsel, camsız düzlemsel ve vakum tüplü güneş kolektörleri, güneş bacaları, güneş havuzları, su arıtma sistemleri, hacim ısıtma ve soğutma düşük sıcaklık

uygulamalarına örnek olarak verilebilir. Bu örnekler içinde en yaygın olarak kullanılanları basit yapıda olanları düzlemsel ve vakum tüplü güneş kolektörleridir. Bu kolektörler yüzeylerine gelen ve güneş kaynaklı ısı enerjisini; hava, su veya başka bir akışkana iletim yolu ile aktarılması prensibine göre çalışmaktadırlar. Söz konusu kolektörler daha çok sıcak su elde etmek amacı ile kullanılmaktadırlar. Temel olarak güneş kolektörü ile bir su depolama tankından oluşmaktadırlar. Şekil 3.22 'de su ısıtma sistemlerinde kullanılan üç çeşit kolektöre ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.22. Camlı düzlemsel kolektör (a), Vakum tüplü kolektör (b), camsız düzlemsel kolektör (c) (Erdemir ve ark., 2018).

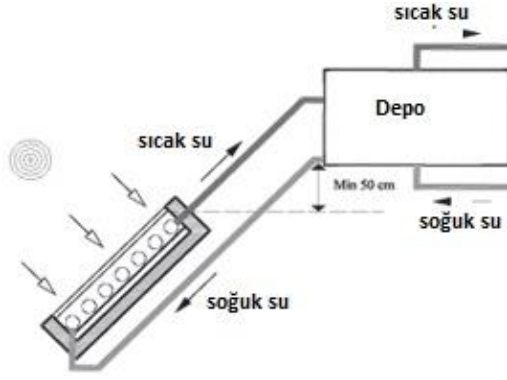
3.2.1.1. Düşük sıcaklıkta su ısıtma sistemleri

Kolektör sistemleri kullanım suyunun doğal dolaşımli veya cebri sirkülasyonlu olması ile ısınan suyun doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmasına bağlı olarak dört farklı biçimde sınıflandırılabilir. Bunlar;

- ✓ Doğal dolaşımli açık sistemler,
- ✓ Doğal dolaşımli kapalı sistemler,
- ✓ Cebri dolaşımli açık sistemler
- ✓ Cebri dolaşımli kapalı sistemlerdir.

Doğal dolaşımli açık sistemler;

Doğal dolaşımli açık sistemlerde; ısınan su yoğunluğunun soğuk su yoğunluğuna göre azalması nedeniyle sıcak su, sistemde yükselme (dolaşma) eğilimi gösterir. Yoğunluğu azalmış olan sıcak su hafifleyerek sistemde bulunan deponun üst seviyesinden depoya girer.

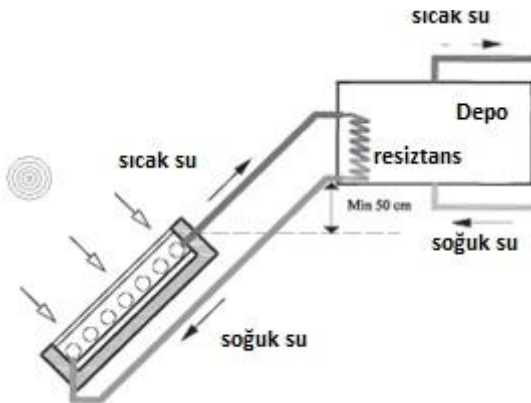


Şekil 3.23. Doğal dolaşimli açık sıcak su sisteminin şematik gösterimi (Anonim).

Depoda bulunan sudan soğuk olanı, depo altında toplanır bu su depo altından kolektöre ulaştırılarak tekrar ısıtılıp yükselme hareketi ile döngüyü gerçekleştir (Şekil 3.23). Doğal dolaşimli güneş enerjili açık sıcak su sistemlerinde pompa kullanılmaz ve bu sistemlerde ısıtılan su kullanım suyunun kendisidir.

Doğal dolaşimli kapalı sistemler;

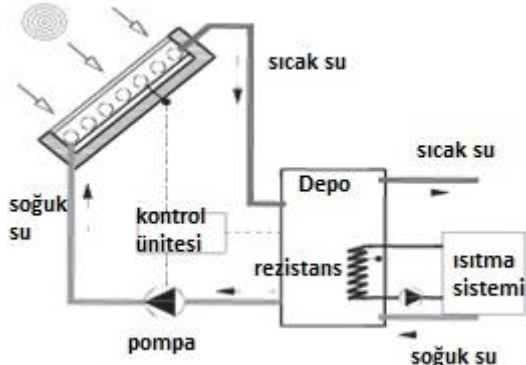
Doğal dolaşimli güneş enerjili kapalı sıcak su sistemlerinde; kolektör tarafından ısıtılan akışkan, kolektör seviyesinin üstünde bulunan depoda bir rezistansın içerisinde dolaşarak depoda bulunan kullanım suyuna ısını vererek sıcak suyu kullanıma hazır hale getirir. Yine pompa kullanılmayan doğal dolaşimli güneş enerjili kapalı sıcak su sistemlerinde; güneş ısını alan akışkan, oluşan yoğunluk farkı nedeni ile kapalı bir devre içinde dolaşırken kolektör üst seviyesinde bulunan depodaki kullanım suyunu rezistans yardımı ile ısıtarak soğumuş bir şekilde devreyi tamamlar. Şekil 3.24'te doğal dolaşimli güneş enerjili kapalı sıcak su sisteminin şeması verilmiştir.



Şekil 3.24. Doğal dolaşimli kapalı sıcak su sisteminin şematik gösterimi (Anonim).

Cebri dolaşımli açık sistemler;

Isı transferinin, akışkanın bir pompa yardımı ile sistemde dolaştırılması sonucunda gerçekleştiği cebri dolaşımli güneş enerjili sıcak su sistemlerinde pompa olması nedeni ile sistemdeki deponun kolektör üst seviyesinde olmasına gerek yoktur (Bayar, 2016).

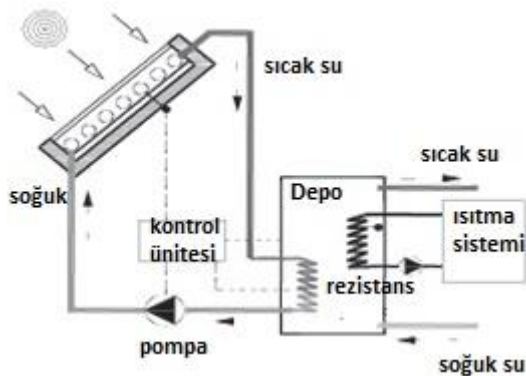


Şekil 3.25. Cebri dolaşımli açık sıcak su sisteminin şematik gösterimi (Anonim).

Şekil 3.25.'te şematik gösterimi verilen cebri dolaşımli güneş enerjili sıcak su sistemlerinde şekilde de görüldüğü üzere kolektör tarafından ısıtılan akışkan kullanım suyunun kendisidir. Bu sistemlerde kolektör su sıcaklığı ve depo suyu sıcaklığı termostatlar yardımı ile ölçülerek kontrol ünitesine aktarılır. Kontrol ünitesinde programlanan set sıcaklıklarına göre pompa/pompalara komut gönderilerek pompa çalıştırılır veya durdurulur.

Cebri dolaşımli kapalı sistemler;

Bu sistemlerde kullanım suyu ile ısıtma suyu tamamen farklı ve birbirlerine karışmazlar. Yine sisteme dâhil edilen pompa vasıtası ile ısıtma akışkanı kolektörlerden aldığı ısıyı kullanım suyu deposunda bulunan rezistans yardımı ile kullanım suyuna aktarır.



Şekil 3.26. Cebri dolaşımli kapalı sıcak su sisteminin şematik gösterimi (Anonim).

Cebri dolaşımli güneş enerjili kapalı sıcak su sistemlerinde ısıtıcı akışkan pompa vasıtası ile sistemde hareketlendirildiği için deponun kolektör üst seviyesinde olmasına gerek yoktur.

3.2.1.2. Düşük sıcaklıkta hacim ısıtma sistemleri

Güneş enerjisinin kullanıldığı bir diğer alan ise hacimlerin güneş enerjisi ile ısıtılmasıdır. Güneş doğal ısı kaynağı olduğundan ısıtma amaçlı kullanımı diğer kullanım alanlarına göre daha kolaydır. Çünkü ısı elde etme dışındaki kullanımlar için güneş enerjisinin birtakım dönüşümlerden geçirilmesi gerekmektedir. Güneş enerjisinin hacim ısıtmasındaki kullanımı; ısının söz konusu hacme iletilme biçimine göre temelde iki başlık altında incelenebilir. Bunlar pasif ısıtma sistemleri ile aktif ısıtma sistemleridir.

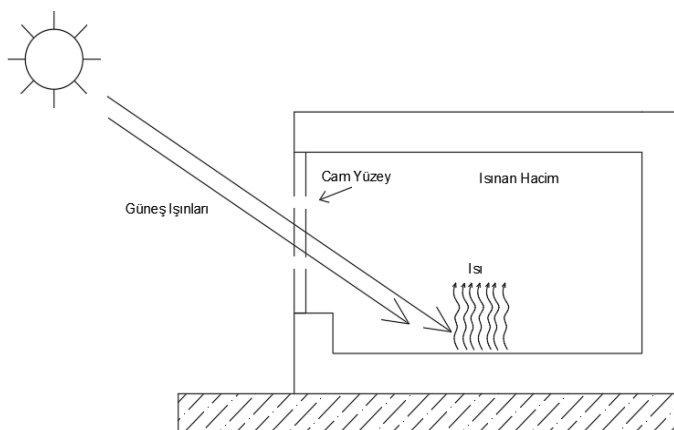
✓ Pasif ısıtma sistemleri

Pasif ısıtma sistemleri; ısıtılacak hacmin güneş ısını absorbe edici olarak dizayn edildiği ve herhangi bir mekanik sistemin kullanılmadan doğrudan güneşin doğal ısının kullanılarak ısıtıldığı sistemlerdir.

Pasif ısıtma sistemlerinde, hacimlerin tasarımı aşamasında alınan planlama kararları ve seçilen malzemeler oluşacak ısıtmanın veriminde oldukça önem arz etmektedir. Bu sistemlerde ısıtılacak hacmin farklı bileşenlerine ulaşan güneş ısısı toplanıp depolanarak ve ısı transfer biçimlerinden bir veya birkaçı vasıtası ile söz konusu hacim ısıtılır. Pasif ısıtma sistemlerini, ısı kazanma şekillerine göre doğrudan ısı kazançlı pasif sistemler ve dolaylı ısı kazançlı pasif sistemler olarak ikiye ayırmakta fayda vardır.

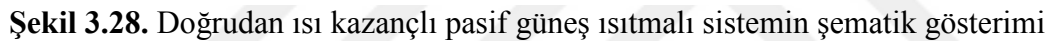
Doğrudan ısı kazançlı pasif güneş ısıtmalı istemler;

Bu sistemlerde güneş ışınları ısıtılacak hacmin içine bakan güney cephesinden pencere veya çatı aralıklarından iç yüzlere ulaşır, güneş ışınları bu iç yüzeyler tarafından soğrulur. Bu soğrulma neticesinde açığa çıkan ısı hacmin ısıtılmasını sağlamış olur (Bayar, 2016). Şekil 3.27’de doğrudan ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmalı sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.27. Doğrudan ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmalı sistemin şematik gösterimi

Dolaylı ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmal sistemlerde ısı, ısıtılacak hacme direk etki etmek yerine söz konusu hacmin ısı depolamaya uygun yapı elemanına (siyaha boyanmış beton, dolu tuğla, kerpiç, taş vb.) etki ederek ısıtır. Isınan bu yapı elemanları ise depoladıkları ısıyı hedef hacme iletim veya taşınım yolu ile ulaştırarak ısıtmış olurlar. Şekil 3.28’de dolaylı ısı kazançlı pasif güneş ısıtılmal sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Güneş enerjisinden faydalanılarak hacim ısıtma yöntemlerinden bir diğeri olan aktif ısıtma sistemlerinde ise pasif ısıtma sistemlerinden farklı olarak sisteme güneş tarafından ısıtılan akışkanı hareketlendirip istenilen noktaya iletecek bir mekanik eleman dâhil edilir. Bu mekanik eleman kullanılan akışkanın cinsine göre kimi zaman bir sirkülasyon pompası olurken kimi zaman da bir fan olabilmektedir.

Güneş enerjisinin yüksek sıcaklık uygulamaları; çeşitli lens ve ayna konfigürasyonları kullanılarak güneş enerjisini yüksek ısıya dönüştürerek bu sayede genellikle elektrik enerjisi üreten uygulamalardır. Bu tip sistemlerde güneş enerjisinin ısıl değeri 70 kattan 3000 kata artırılabilir (Kahraman, 2010).

33

etme) ve ısı depolamadır. Hibritleşme ile santralden elektrik üretimi 330 gün 24 saat mertebesine çıkarılarak süreklilik sağlanıyor. Isı depolamalı sistemler ise ergimiş tuz depolarında gündüz toplanan ısıyı destekleyerek güneşlenmeden sonra 5-7 saat daha elektrik üretebiliyor ve akşam saatlerinde meydana gelen talep artışını karşılayabiliyor (Livatyalı ve ark. 2012).

YGE sistemlerinde elde edilen yüksek ısı elektrik üretimi için türbin/türbinlere gönderilir. Bu sistemler temel olarak güneş enerjisini toplayıp ısıya dönüştüren birim ile bu ısıyı elektrik enerjisine çeviren birim olmak üzere iki sistemden oluşmaktadırlar. Düzlemsel güneş kolektörleri için kullanılan kavram ve tarifler yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri için de geçerlidir. Ancak YGE sistemleri daha karmaşık yapıya sahip olmaları nedeni ile bunlar için yeni tariflerin yapılması gerekmektedir. Bu tarifler; kolektörlerde güneş enerjisinin düştüğü net alana “açıklık alanı” ve güneş enerjisinin absorbe edilerek ısı enerjisine çevrildiği yüzeye ise “alıcı yüzey” denir

YGE sistemi kolektörlerinde en önemli kavramlardan biri ise yoğunlaştırma oranıdır. Bu oran; açıklık yüzeyinin, alıcı yüzeye oranı olarak izah edilebilir. Yoğunlaştırma oranı iki boyutlu yoğunlaştırıcılarda (Parabolik oluk) 300, üç boyutlu olanlarda ise (Parabolik çanak) 40 000 mertebesinde (Kepekçi, 2014).

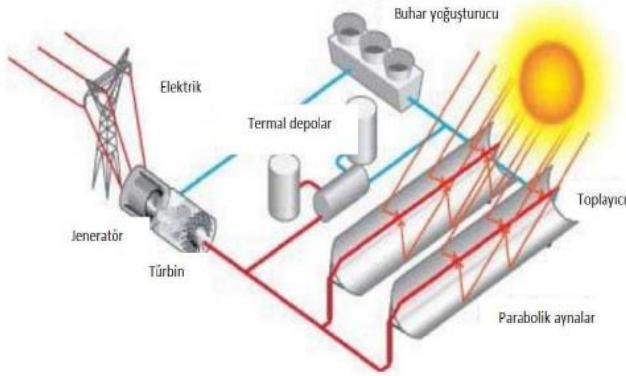
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri;

- ✓ *Parabolik oluk sistemleri*
- ✓ *Fresnel aynalı yoğunlaştırıcılar*
- ✓ *Parabolik çanak sistemleri*
- ✓ *Güneş kulesi (Merkezi Alıcılar) şeklinde incelenebilir.*

3.2.2.1. Parabolik oluk sistemleri

Doğrusal yoğunlaştırıcı sistemler olarak da adlandırılan bu sistemler; güneş gelen ışınımı, parabolik oluk şekline dönüştürülmüş yansıtıcı aynaları aracılığıyla oluğun odak çizgisi doğrultusunda yerleştirilmiş alıcı boruya iletirler. Borunun içinde bulunan ve yüksek ısıyı taşıyabilen ısı transferi akışkanı (sentetik yağ veya ergimiş tuz) bu borudaki yüksek ısıyı alır buhar jeneratöründe buhar üretmek üzere kullanılır. Buhar üretiminden sonra söz konusu buhar, farklı enerji biçimlerine dönüştürülmek üzere hazır hale gelmiş olur.

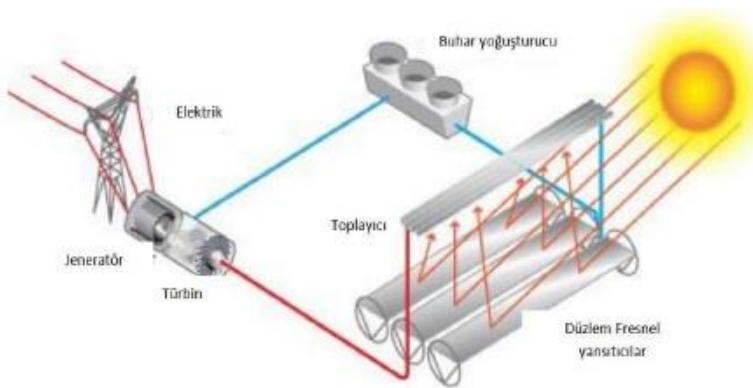
Bu sistemlerde güneşin hareketinden dolayı güneşi doğudan batıya doğru izleyip güneş ışınımalarını olukların odak noktasına yoğunlaştıracak şekilde güneş izleme sistemi mevcuttur. Şekil 3.29’de parabolik oluk sistemlerini gösterir bir şema verilmiştir.



Şekil 3.29. Parabolik oluk sisteminin şematik gösterimi (Üçgül ve ark. 2019).

3.2.2.2. Fresnel aynalı yoğunlaştırıcılar

Fransız fizikçi Fresnel tarafından geliştirilen ve kendi adının verildiği Fresnel aynasının en hayati özelliği ışık kaynağının, farklı taraflardan gelen ışınları tek bir istikamete aktarmasıdır. Böylelikle ışığın doğrultusu kontrol altına alınmaktadır. Şekil açısından oluk yansıtıcılara benzeyen bu sistemde güneş ışığı, pek çok ince uzun ayna kullanılarak içinde sıvı dolaşan ve aynalarından yüksek seviyede bulunan alıcıya odaklanır.



Şekil 3.30. Fresnel aynalı yoğunlaştırıcı sisteminin şematik gösterimi (Üçgül ve ark. 2019).

Kepekçi (2010)’ye göre; Fresnel aynalı yoğunlaştırıcı sistemlerinde bulunan alıcı, yansıtıcı aynalardan takriben 10 metre yüksekliktedir. Bu durum optik verimin parabolik oluk kolektörlere göre düşük olmasına sebeptir.

3.2.2.3. Parabolik çanak sistemleri

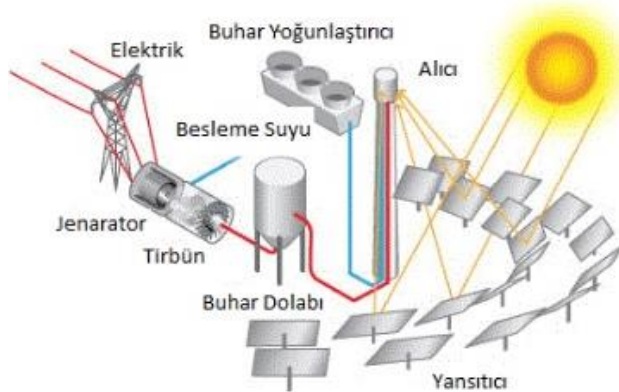
Bu sistemlerde ise büyük konkav bir aynanın odağında bulunan alıcıda toplanan ısı, arkasında yer alan stirling motoruyla mekanik enerjiye dolayısı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneşi iki eksen boyunca izleyen sistemlerde odaklanma oranı iyidir ve alıcı sıcaklığı 250-700 °C arasında olabilir (Livatyalı ve ark., 2012). Soğuk iken sıkıştırılmış olan akışkan, alıcıda ısının artması ile bir türbin veya piston sisteminde genişlerken iş üretir ve bu güç jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür.



Şekil 3.31. Parabolik çanak sisteminin şematik gösterimi (Üçgül ve ark. 2019).

3.2.2.4. Güneş kulesi (merkezi alıcılar)

Bu sistemlerde güneşten gelen direkt ışınlar, geniş bir alana yayılmış ve iki eksenli güneş takip sistemleri ile donatılmış çok sayıda ayna (heliostat) tarafından kule üzerindeki alıcı üzerine yoğunlaştırılır. (Aydar ve ark., 2010).



Şekil 3.32. Güneş kulesi sisteminin şematik gösterimi (Üçgül ve ark. 2019).

Yüksek maliyet nedeniyle ticari uyulama olarak parabolik oluk sistemlerine kıyasla henüz yaygınlık kazanmamış bu sistemlerde hem verim daha yüksektir hem de güneş

ışınlarının azaldığı veya olmadığı saatlerde elektrik üretimini sağlamak üzere enerji (ısı) depolamak daha kolaydır (Livatyalı ve ark., 2012).

Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinin; verim, çıkış sıcaklıkları, ilk yatırım maliyetleri ve enerji maliyetleri parametreleri karşılaştırmalı olarak Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Yoğunlaştırılmış sistemlerinin teknik ve ekonomik kıyası (Aydar ve ark., 2010).

Teknoloji Türü	Sistem Verimi (%)		Çıkış Sıcaklığı (C°)	İlk Yatırım Maliyeti (\$/kWe)	Enerji Maliyeti	
	Elektrik	Isı			Elektrik (\$/kwh)	Isı (\$/kwh)
Parabolik Oluk	14-20	46	380	2800	0,15	0,0053
Fresnel Aynalı	7	22	450	2000	0,20	0,007
Merkezi Alıcı	18-25	46	600-700	3000	0,16	0,004
Parabolik Çanak	24	79	700	5000	0,28	-

4. ISI POMPALARI

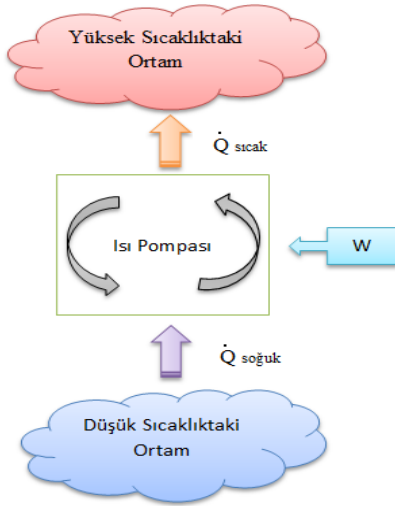
Isıl enerjinin yüksek sıcaklıktaki kaynaktan düşük sıcaklıktaki kaynaklara doğru olduğu bilinen bir gerçektir. Bu sistemin tersi kendiliğinden meydana gelmez. Bu durum soğutma makineleri ve ısı pompaları denilen istisnai makinelerin kullanımını gerektirmektedir (Çengel ve Boles, 2015).

Soğutma makineleri ile ısı pompaları aynı çevrim prensibine göre çalışmaktadırlar. Ancak kullanım amaçları birbirine zıttır.

Isı pompası tanım olarak; düşük sıcaklıkta ve ekonomik değeri olmayan ısının, yüksek sıcaklıktaki ortama pompalanması prensibine dayalı ve yardımcı enerji kaynağı olarak ise elektrik enerjisi ile beslenen sistemlerdir şeklinde tanımlanabilir. Şekil 4.1’de ısı pompasının genel çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir. Bir ısı pompasının verimi ise performans veya etkinlik katsayısı ile izah edilir. Isı pompası için etkinlik katsayısı;

$$COP_{IP} = \frac{\text{Eld edilmek istenen değer}}{\text{Harcanması gereken değer}} = \frac{Q_{Sıcak}}{W} \quad (4.1)$$

denkleminde göre elde edilir.



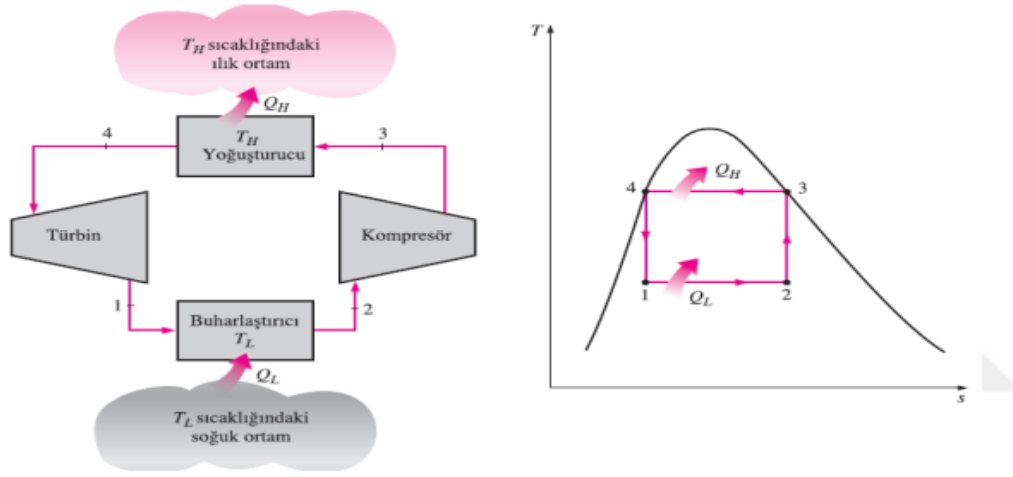
Şekil 4.1. Isı pompası genel çalışma prensibinin şematik gösterimi

Isı pompalarının en önemli özelliği; sistem çevriminin gerçekleşebilmesi için harcanması gereken enerjiden daha fazlasını kaynaklar arasında aktarabilmesidir.

4.1. Isı Pompaları İçin Termodinamik Çevrimler

4.1.1. Tersine Carnot Çevrimi

Carnot çevrimi, birbirinden farklı sıcaklıklara sahip iki ısı kaynağı arasında çalışan tersinir bir soğutma çevrimidir. Tersine Carnot çevrimi ise iki belirli sıcaklık seviyesi arasında çalışan en etkin soğutma çevrimidir. Bu nedenle soğutma makinaları ve ısı pompaları için olası ideal çevrim olarak Tersine Carnot çevriminin incelenmesi doğaldır. Şekil 4.2’de ters Carnot soğutma makinesinin şematik gösterimi ile bu çevrimin T-s diyagramı verilmiştir. (Çengel ve Boles, 2015).



Şekil 4.2. Ters Carnot soğutma makinesinin şematik gösterimi ve T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2012).

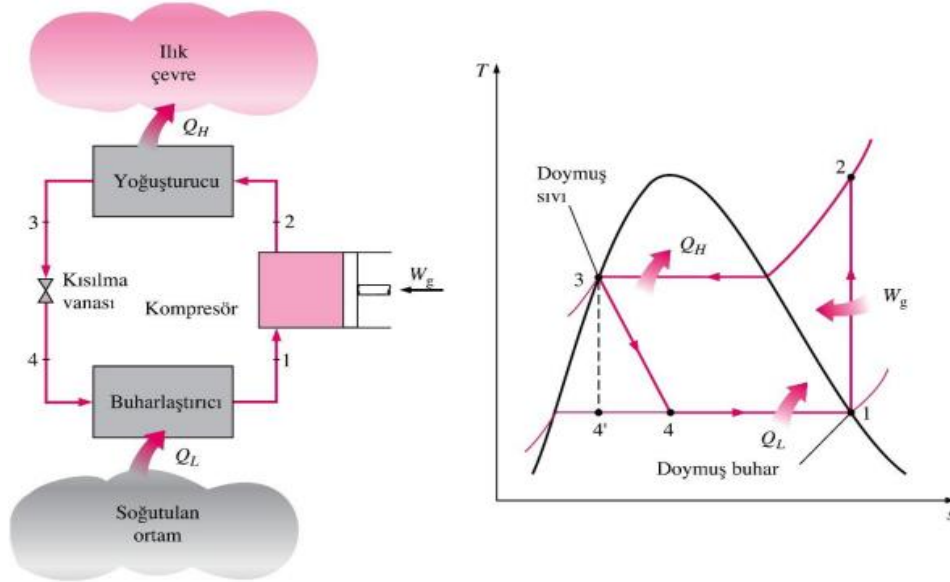
Ters Carnot soğutma çevrimi dört hal değişiminden meydana gelir ve bu hal değişimleri Şekil 4.2’ye göre;

- 1-2 noktalarında sabit sıcaklıkta soğuk ortamdan akışkana ısı geçişi
- 2-3 noktalarında kompresörde soğutucu akışkanın izantropik sıkıştırılması
- 3-4 noktalarında soğutucu akışkandan sabit sıcaklıktaki ılık ortama ısı geçişi
- 4-1 noktalarında türbinde soğutucu akışkanın izantropik genişlemesi şeklinde gerçekleşir.

4.1.2. İdeal buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi

Isı pompalarında en çok kullanılan çevrim, ideal buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimidir. Bu çevrim için genel çizim ve sistemin T-s diyagramı Şekil 4.3’te verilmiştir.

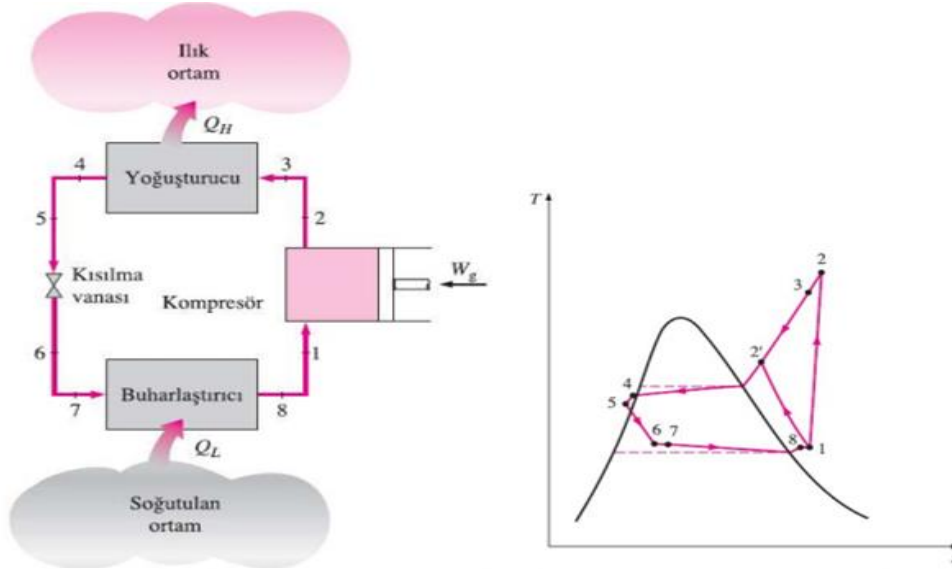
- 1-2 noktaları arasında kompresörde izantropik sıkıştırma
- 2-3 noktaları arasında yoğusturucuda çevreye sabit basınçta ısı verilmesi
- 3-4 noktaları arasında kısılma vanasında kısılma işlemi
- 4-1 noktaları arasında buharlaştırıcıda sabit basınçta ısı alınması olarak gerçekleşir.



Şekil 4.3. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin şeması ve T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2012).

4.1.3. Gerçek buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi

Bu çevrim, ideal olan buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminden bazı açılardan ayrı olup, bu durum genellikle çevrimi oluşturan çeşitli elemanlardaki tersinmezliklerden kaynaklanır. (Çengel ve Boles, 2015). Gerçek bir buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin T-s diyagramı Şekil 4.4'te verilmiştir.



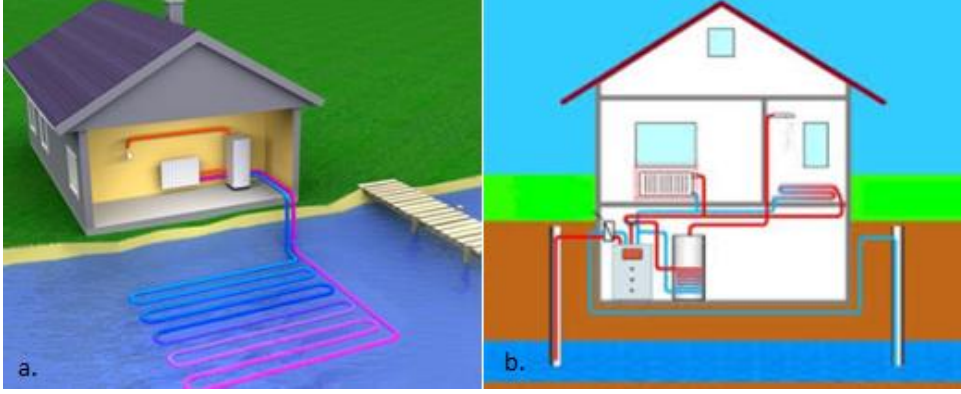
Şekil 4.4. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin şeması ve T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2012).

4.2. Isı Kaynaklarına Göre Isı Pompaları

Isı pompası sistemlerinde buharlaştırıcının ısı çektiği ortam kaynak olarak tanımlanır. Isı pompaları sınıflandırılırken genellikle ısı kaynağına göre sınıflandırılırlar. Kaynaklarına göre; su, hava, toprak ve güneş şeklinde dört başlık altında sınıflandırılabilirler.

4.2.1. Su kaynaklı ısı pompaları

Isı kaynağı olarak suyun kullanıldığı ısı pompaları; su kaynaklı ısı pompaları olarak sınıflandırılır. Su; denizlerden, göllerden, nehirlerden, yer altı sularından ve şehir şebekelerinde elde edilerek ısı pompalarının kaynağı olarak kullanılabilir. Isı kaynağı olarak suyun kullanılacağı ısı pompası sistemleri için kullanılacak suyun sisteme zarar vermemesi için suyun kalitesi muhakkak ölçülmeli ve bu husus dizaynda göz önüne alınmalıdır. (Durmaz, 2012).



Şekil 4.5. Yüzey su kaynaklı (a.) ve yer altı su kaynaklı (b.) ısı pompası şemaları (Anonim)

4.2.2. Hava kaynaklı ısı pompaları

Hava her yerde bulunması, ekonomik olması ve kullanımının kolay olması gibi nedenlerle ısı pompalarında en çok kullanılan ısı kaynağıdır. Birçok avantajın yanında; kararlı bir sıcaklığa sahip olmaması havayı ısı pompalarında ısı kaynağı olarak dezavantajlı duruma getirmektedir. Şekil 4.6’da hava kaynaklı bir ısı pompasının şematik görünümü verilmiştir. Burada buharlaştırıcıda ısı geçişi düşüktür. Bu sebeple ısı transferini arttırmak için arttırılmış alanlardan ve kanatçıklardan faydalanılır (Alkan, 2014).

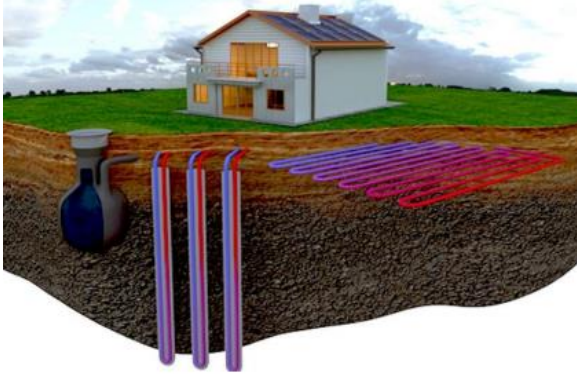


Şekil 4.6. Hava kaynaklı ısı pompasının şematik görüntüsü (Bilen ve Demir, 2021).

4.2.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde; toprak ısı değiştiricileri toprağın altına yatay ve dikey olmak üzere iki farklı şekilde döşenmektedirler (Şekil 4.7). Toprağın altına yatay veya dikey olarak uygulanan ısı değiştiricilerinin boru uzunlukları ihtiyaç duyulan enerji miktarı ile uygulamanın yapılacağı alana göre değişkenlik gösterir. Bununla birlikte

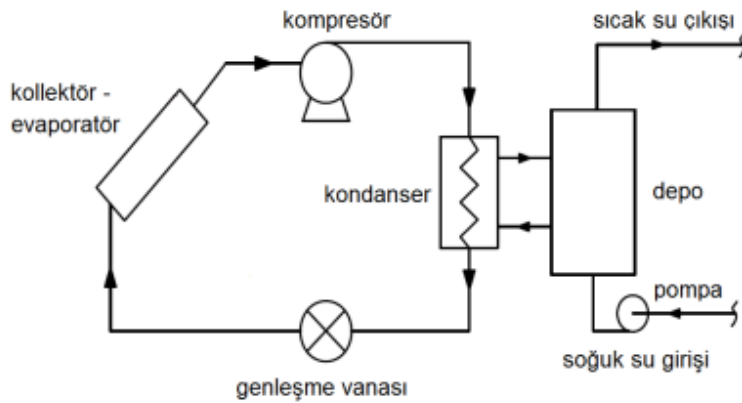
toprağın altına gömülen ısı değiştirici borusunun büyüklüğü enerji kapasitesi ile doğru orantılıdır. Toprağın özelliği ısı değiştiricisinin seçiminde ve belirlenmesinde hayati değişkenlerdir (Alkan, 2014).



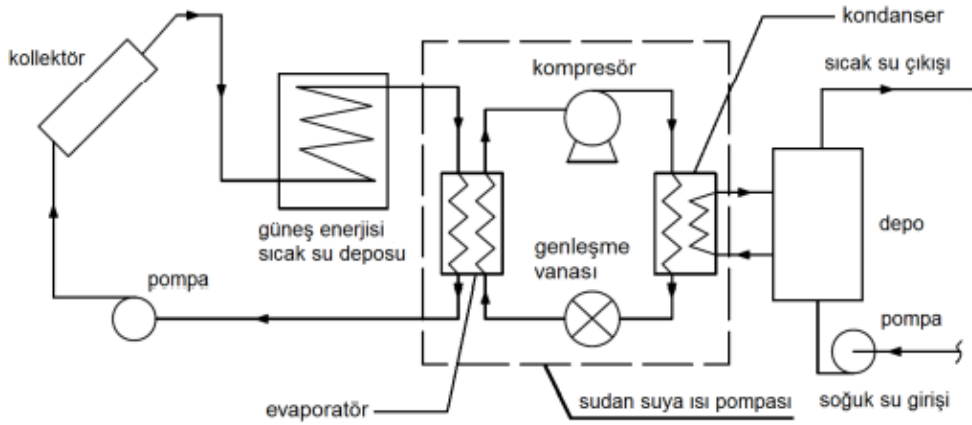
Şekil 4.7. Yatay ve dikey toprak kaynaklı ısı pompası şeması (Alkan, 2014).

4.2.4. Güneş kaynaklı ısı pompaları

Isı kaynağı olarak güneş; ısı pompası buharlaştırıcı sıcaklığının yüksek seçilmesine olanak sağlar. Bu sistemlerde güneş enerjisinde direkt ve endirekt olmak üzere iki şekilde yararlanılmaktadır (Yılmaz, 2000). Şekil 4.8’de direkt, Şekil 4.9’da endirekt genleşmeli güneş enerjisi kaynaklı bir ısı pompası görülmektedir.



Şekil 4.8. Direkt genleşmeli güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası şeması (Li ve Yang 2009).



Şekil 4.9. Endirekt genleşmeli güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası şeması (Li ve Yang 2009).

4.3. Isı Pompası ve Soğutucu Akışkanlar

Isı pompası sistemlerinde bulunması gereken temel elemanlar;

- ✓ Kompresör
- ✓ Kondanser (Yoğuşturucu)
- ✓ Evaporatör (Buharlaştırıcı)
- ✓ Genleşme Vanası (Kısılma Vanası) şeklinde sıralanabilir.

Soğutucu akışkanlar ise, buhar sıkıştırmalı çevrim esasına göre çalışan ısıtma ve soğutma sistemlerinde, sıvı halden buhar haline (evaporatör devresi) ve buhar halinden de tekrar sıvı haline (kondanser devresi) dönen ve bu çevrimleri ısı alışverişi ile sağlayan akışkanlara soğutucu akışkan veya refrigerant denir.

Soğutucu akışkan olarak freonlar; kloroflorokarbonlar (KFK), hidrokloroflorokarbonlar (HKFK), amonyak (CH_3), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) gibi hidrokarbonlar, karbondioksit (CO_2) gibi kimyasallar kullanılmaktadır. En yoğun tercih edilenler freonlardır. Ancak yapılan son çalışmalar, bu akışkanların çevreye olan olumsuz etkileri olduğu hususu netleşmiştir. Tablo 4.1’de soğutucu akışkanların hem ozon tabakasına etkisi (ODP) hem de sera etkisi değerleri verilmiştir. Bu zararlı akışkanların yerini almak üzere R134a, R410a, R407c gibi farklı soğutucu akışkanlar geliştirilmiştir (Koçak, 2012).

Tablo 4.1. Soğutucu akışkanların ozon tabakasına etkileri ile sera etkisi (Seçilmiş, 2006).

Soğutucu Akışkan	Kimyasal Formülü	ODP	GWP	Atm. Ömrü (Yıl)
CFC-11	CCl ₃ F	1,00	1300	59
CFC-12	CCl ₂ F ₂	0,93	3700	122
CFC-113	CCl ₂ FCCLF ₂	0,83	1900	98
CFC-114	CCl ₂ F ₂ CCIF ₂	0,71	6400	244
CFC-115	CCIF ₂ C F ₃	0,38	13800	539
HCFC-22	CHClF ₂	0,05	510	18
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	0,02	28	2
HFC-134a	CF ₃ CH ₂ F	0	400	18
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	0	46	2
Karışımlar:	CFC-12	%73,8	0,74	2700
CFC-500	HCFC-152a	%26,2		
CFC-502	CFC-115	%51,2	0,22	7300
	HCFC-22	%48,8		
Su	H ₂ O	0	0	
Amonyak	NH ₃	0	0	
Karbondioksit	CO ₂	0	100	230

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Iğdır ili iklim koşullarında; zemin kat, ara kat, çatı katı ve teras kısımlarında meydana gelen ve yörede bulunan doğal taştan yapılacak bir evin elektrik enerjisini sağlayacak PV sistem düşünülüp gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu çerçevede söz konusu evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi tespit edilip bu enerjiyi sağlayacak PV (Fotovoltaik) sistemin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında PV*SOL programından PV sistemin kurulacağı nokta seçilerek o noktanın iklim verilerine ve çevresel faktörlere (ağaç, yapı vs.) göre gölgelenme analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada evin kullanım sıcak su ihtiyacını karşılayabilecek ve PV sistemine entegre edilebilecek ısı pompasının teorik hesabı yapılmıştır. Bunun için evaporatörü PV paneller olan ısı pompası destekli PV/T sisteminin evin ihtiyacı olan elektrik enerjisi ile ihtiyaç duyulan kullanım sıcak suyunun sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca ısı pompasının, evin yerden ısıtma sistemine entegrasyonu halinde ısıtma sistemine olacak katkısı irdelenmiştir. Son olarak toplam sistemin termoekonomik analizi yapılmıştır.

Yörede bulunan ve söz konusu evin yapımında kullanılan doğal taş örneklerinin laboratuvar ortamında ölçümleri yaptırılarak ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Yörenin farklı bölgelerinde yer altında çıkarılan doğal taşların laboratuvar ortamında ölçülen ısı iletkenlik katsayılarına göre, hiçbir yalıtım malzemesi kullanılmadan sadece bu taşların kullanılması durumunda en düşük duvar kalınlıkları belirlenmiştir. Bu ısı iletkenlik katsayıları ile evin proje ve uygulama verileri üzerinden gidilerek, TS825 ısı yalıtım standartlarına göre uygulamanın uygun olup olmayacağı hesaplanmıştır.

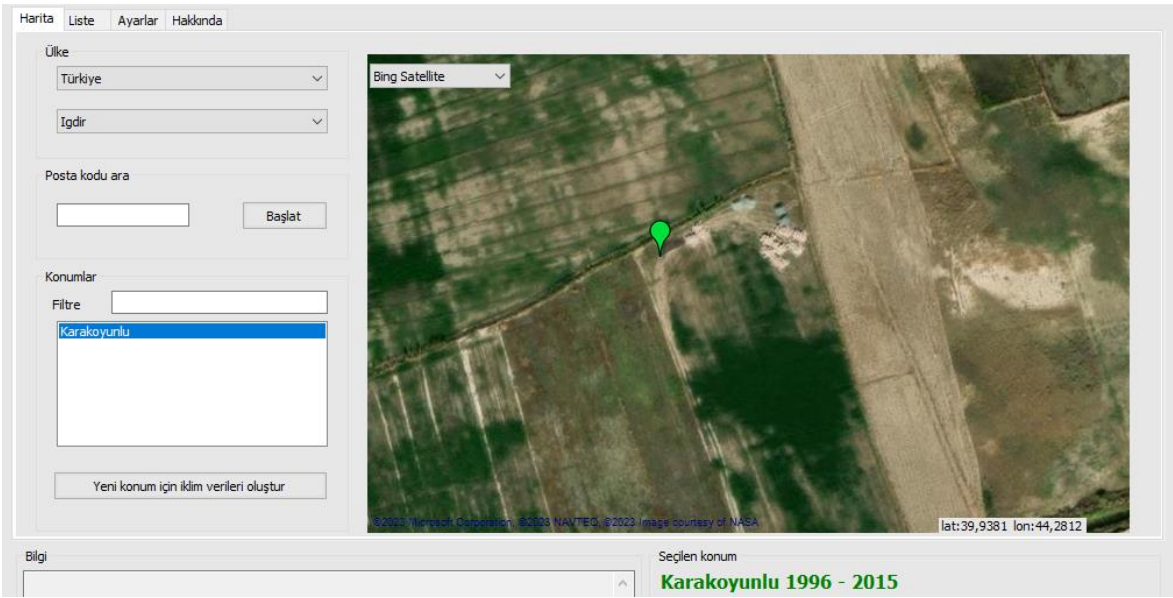
5.1. Evin İhtiyaç Duyduğu PV Sistem Tasarımı

PV sistem tasarımı için; öncelikle uygulamanın yapılacağı bölgeye ait ortalama ışınım değeri, bölgenin günlük ortalama güneşlenme süresi ve söz konusu evde kullanılacak elektrikli cihazların günlük ortalama tüketim değerlerinin bilinmesi veya hesap edilebilir olması gerekmektedir.

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi günümüzde yaygın kullanılan monokristal güneş panelleri, en yüksek verimlilikteki güneş panel tipi olmaları sebebi ile bu çalışmada da monokristal güneş paneli tercih edilmiştir.

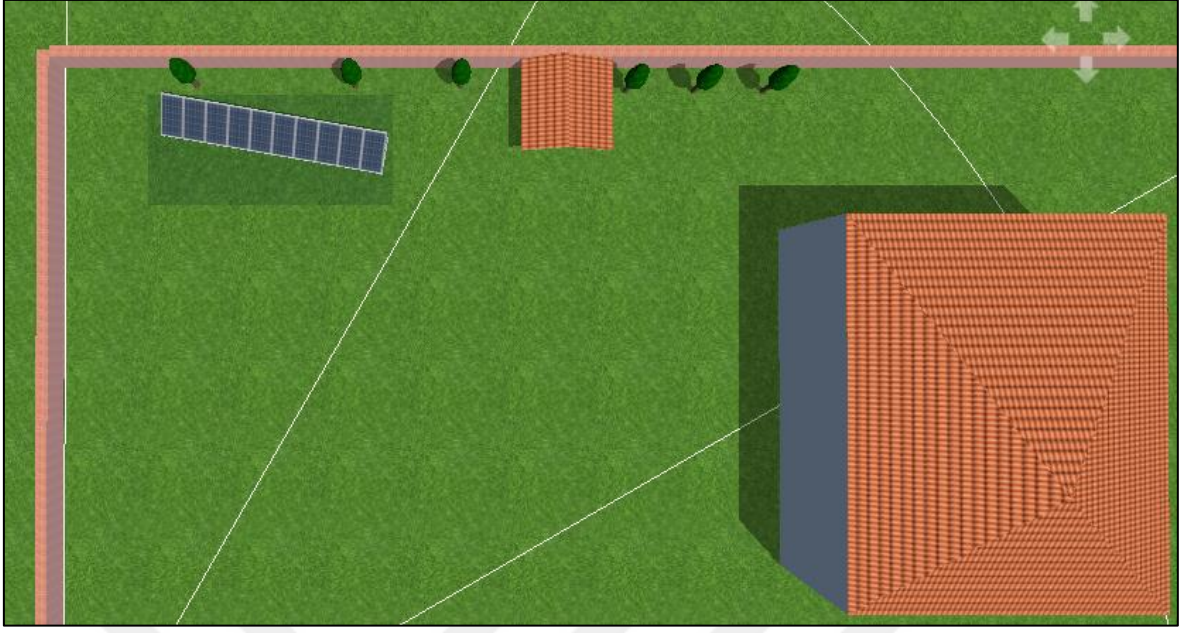
PV sistemi kurulmadan önce konum, panel eğimi, sistem açısı ile ışıınım şiddeti ile panel sıcaklık dağılımlarını analiz etmek için PV*SOL programından faydalanılmıştır. PV*SOL; fotovoltaiik sistemler için bir tasarım ve simülasyon yazılımı olup fotovoltaiik sistemlerin, cihazlar, batarya sistemleri ve elektrikli araçlarla tasarımı ve optimizasyonu için kullanılmaktadır.

Sistemde kullanılacak panel verileri ile sistemin kurulacağı nokta (Şekil 5.1) ve çevresel faktörler (ağaç, ev, yapı vs.), PV*SOL programına yüklenerek söz konusu lokasyonun programın veri tabanında yer alan iklim verilerine göre tasarımı yapılan PV sistemin gölge analizi yapılmıştır.



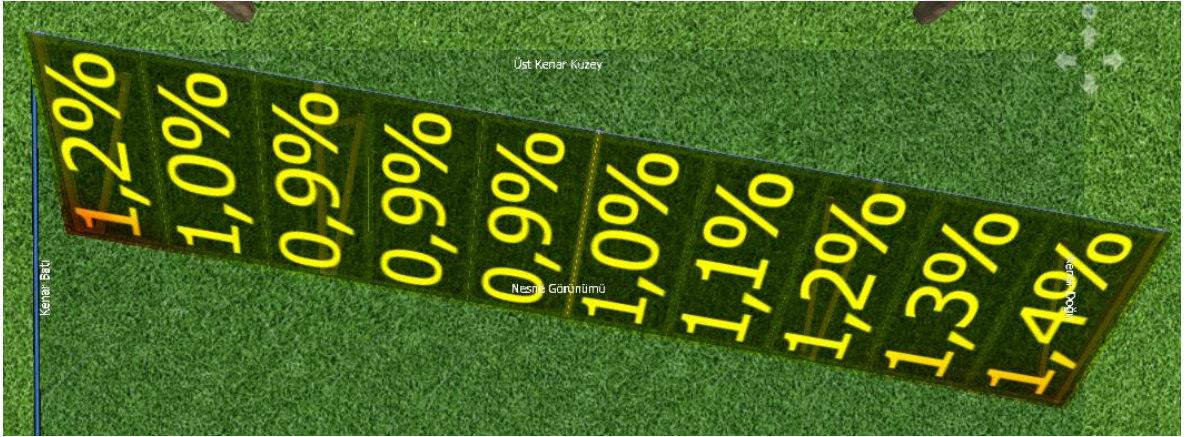
Şekil 5.1. PV sistemin kurulacağı yerin PV*SOL programında seçilmesi

PV*SOL programında sistemin kurulacağı noktanın iklim verileri, 1996-2015 yılları arasındaki veriler olup; program gölge analizini, en uygun panel eğimi ile PV sistemin uygun konum açısını bu verilere göre simüle etmektedir. Bunun için PV sistemimizi kuracağımız alandaki çevresel faktörleri programda tasarlayarak ardından gölgelenme analizine geçtik (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. PV sistemin kurulacağı alandaki verilerin programa yerleştirilmesi

PV*SOL programında çevresel faktörlerle birlikte teorik hesabı yapılan panel sistemi de programa işlendikten sonra panellerin gölge analizi yapıldı ve panellerin eğimi 30° , sistemin açısı ise 190° olarak belirlendi (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. PV*SOL programında panellerin gölge analizi

Söz konusu konumda, eğimde ve sistem açısında yapılan gölge analizi neticesinde PV sistemin verimli olacağı anlaşılmıştır.

Doğal taştan imalatı gerçekleştirilen ev şebekeden uzak bir bölgede olduğundan evin solar sistemi şebekeden bağımsız (off grid) sistem olacaktır. Bu evde kullanılacak elektrikli cihazların günlük ortalama tüketim değerleri ile çalışma sürelerine ait veriler Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablodan söz konusu evin ihtiyaç duyduğu günlük elektrik enerjisi miktarının 16,33 kWh/gün olduğu hesaplanmıştır.

Bu evin ihtiyaç duyduğu 16330 Wh günlük enerjiyi sağlayacak sistemin verimi denklem (5.1)'e göre hesaplanır.

$$\eta_{sis} = \eta_{akü} * \eta_{panel} * \eta_{inv} \quad (5.1)$$

Burada ; $\eta_{akü}$, η_{panel} ve η_{inv} sırası ile sistemde kullanılacak akülerin, panellerin ve invertörün verimlerini ifade etmektedir. Panel verimi üretici firma kataloglarında 0,97 olup invertör verimi 0,96 ve akü verimi ise 0,75 civarındadır.

$\eta_{sis} = 0,75*0,97*0,96 = 0,69$ olarak hesaplanır.

Tablo 5.1. Evde kullanılacak cihazlara ait veriler (cihaz etiketleri)

ELEKTRİKLİ CİHAZ ADI	CİHAZ ADETİ	GÜNLÜK ÇALIŞMA S. (Saat)	SAATLİK ENERJİ TÜKETİMİ (Wh)	GÜNLÜK ENERJİ TÜKETİMİ (KWh/gün)
Buzdolabı	1	10	150	1,50
Çamaşır Makinası	1	0,5	790,9	0,40
Bulaşık Makinası	1	1	890	0,89
Hidrofor	1	1	850	0,85
Elektrikli Süpürge	1	1,5	900	1,35
Tv	1	5	220	1,10
Bina İç Aydınlatma	12	6	100	7,20
Bina Dış Aydınlatma	4	8	42	1,34
Dalgıç Pompa	1	0,5	1000	0,50
Isı Pompası Sis. Pompası	2	6	100	1,20

Meteoroloji genel Müdürlüğü'nün verilerine göre Iğdır ilinin ortalama günlük güneşlenme süresi 6,3 saat/gün olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile özellikleri Tablo 5.2'de verilen 400W gücündeki bir adet monokristal panelin günlük üretebileceği enerji miktarı (5.2) eşitliğinden hesaplanır.

$$E_p = G_p * t_{g,s} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte E_p , G_p ve $t_{g,s}$ sırası ile panelin üretebileceği enerji miktarı, panelin gücü ve bölgenin ortalama günlük güneşlenme süresini ifade etmektedir. Dolayısı ile bir panelin üretebileceği günlük enerji miktarı;

$E_p = 400W*6,3 \text{ h/gün} = 2520 \text{ Wh/gün}$ olarak hesaplanır.

Bu binanın ihtiyaç duyduğu 16330 Wh/gün olan enerjiyi sağlayacak panel sayısı (PS) günlük ihtiyaç duyulan elektrik miktarı ($E_{\text{gün.ih.}}$) 16330 Wh, Iğdır ilinin günlük güneşlenme süresi ($t_{\text{g.s}}$) 6,3 h/gün, bir panelin gücü (G_p) 400Wh ve sistem verimi (η_{sis}) 0,69 verileri göz önünde bulundurularak denklem (5.3)'e göre hesaplanmıştır.

$$PS = \frac{E_{\text{gün.ih.}}/\eta_{\text{sis}}}{E_p} \quad (5.3)$$

$PS = \frac{(16330\text{Wh/gün})/0,69}{2520\text{ Wh/gün}} = 9,39 \approx 10$ adet olarak hesaplanır. Dolayısı ile teknik parametrelerinin Tablo 5.2'de belirtildiği CNS marka 400 W monokristal panellerden 10 adet kullanarak söz konusu evin günlük ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi elde edilecektir.

Tablo 5.2. Kullanılacak panellerin performans değerleri (ürün etiketi)

Maksimum güç	P_{max} (W)	400 W
Açık devre voltajı	V_{oc} (V)	49,95 V
Kısa devre akımı	I_{sc} (A)	10,30 A
Maksimum güç voltajı	V_{mp} (V)	40,51V
Maksimum güç akımı	I_{mp} (A)	9,91 A
Maksimum sistem voltajı	V_{max} (V)	1000 V
Panel ölçüleri	mm	1959x992x40 mm

Bu evin elektrik enerjisinin akü ile sağlanacağı süreyi 1 gün olarak dikkatte alıp bunun için gerekli akü sayısını (AS) denklem (5.4)'e göre hesaplarız.

$$AS = \frac{E_{\text{gün.ih.}} * A_{\text{deşj}} * A_{\text{sıc.k}} * D_s}{V_a * I_a} \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte; $A_{\text{deşj}}$ (Akü deşarj oranı genellikle 0,5 kabul edilir.), $A_{\text{sıc.k}}$ (Akü sıcaklık katsayısı kataloglarda 1,6 alınır.), D_s (evin ihtiyaç duyduğu enerjinin akülerden sağlanacağı süre 1 gün olarak seçilmiştir), V_a ile I_a akü voltaj ve amper değerlerini ifade etmektedir. Bu sistemde 12V, 100Ah jel akü tercih ederek sistemimiz için gerekli akü sayısını;

$$AS = \frac{(16330\text{Wh/gün}) * 0,5 * 1,16 * 1}{12 * 100} = 7,89 \approx 8$$
 adet olarak hesaplanır.

Akülerin kontrollü bir şekilde şarj olmalarını sağlayacak yani; aküleri aşırı şarj ve deşarjdan korumak için şarj kontrol cihazına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistem için ihtiyaç duyulan şarj kontrol cihazı sayısı ise (5.5) eşitliğinden hesaplanacak olursa;

$$\text{Ş. K. S} = \frac{I_{mp} \cdot PS}{I_{ş,k}} \quad (5.5)$$

Bu eşitlikte; I_{mp} sistemde kullanılacak ve kapasite bilgileri Tablo 5.2’de verilen panellerin maksimum güç akımlarını (9,91 A), PS eşitlik (5.3)’te hesaplanan panel sayısını (10 adet), $I_{ş,k}$ ise sistemde kullanılacak şarj kontrol cihazlarının (1 adet) giriş akımını ifade etmektedir. Bu sistem için giriş akımı 60 A olan şarj kontrol cihazı tercih edilmiştir. Dolayısı ile sistemde kullanılacak şarj kontrol cihazı sayısı;

$$\text{Ş. K. S} = \frac{9,91A \cdot 10 \text{adet}}{60A} = 1,65 \approx 2 \text{ adet olarak bulunur.}$$

Söz konusu evde kullanılacak elektrikli cihazların elektriksel çalışma parametreleri 220V ve 50 Hz alternatif akım (AC) şeklindedir. Ancak solar panellerimizden üretilen elektrik enerjisi farklı voltaj ve Hz’de doğru akımdır (DC). Dolayısıyla solar panellerden üretilen bu enerji ile evde kullanılacak elektrikli cihazlar doğrudan çalıştırılmaz. Bu nedenle solar panellerden üretilen ve akülerde depolanan doğru akım (DC) enerjinin alternatif akım (AC) ye dönüştürülerek kullanılması gerekmektedir. Bunun içinde invertre (dönüştürücüye) ihtiyaç olup bu sistemin gerek duyduğu inverter kapasitesi aşağıdaki (5.6) eşitliliğinden hesaplanabilir.

$$\text{İnv}_K = PS * G_p \quad (5.6)$$

Burada İnv_K inverter kapasitesi (W), PSpanel sayısı ve G_p bir panelin gücünü ifade etmek üzere sistemimiz gerekli olan en düşük inverter kapasitesi;

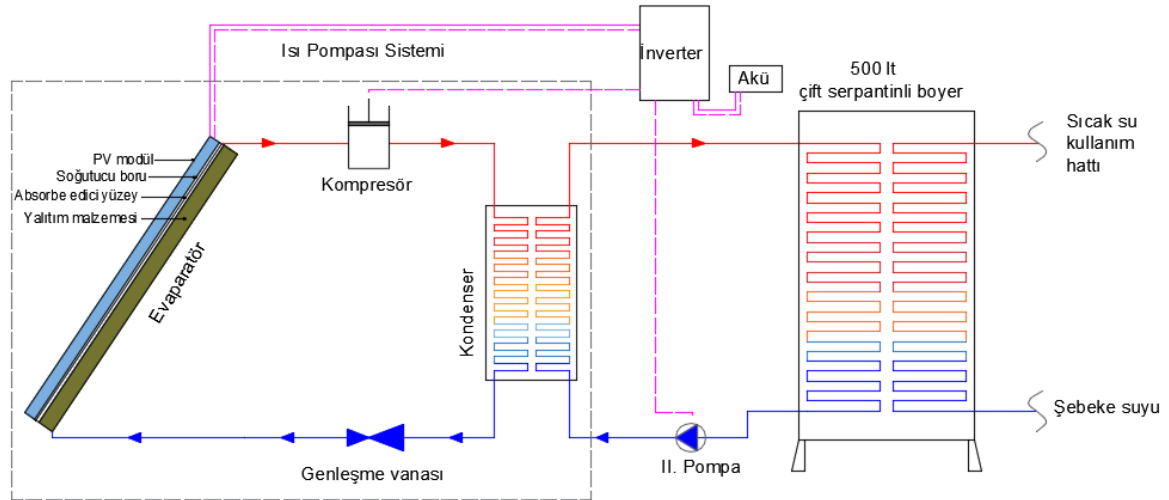
$\text{İnv}_K = 10 * 400W = 4000 \text{ W}$ olarak hesaplanır. Bu sistemimiz için ise performans değerleri Tablo 5.3’te verilen 5000W kapasitede Lexron Smart marka hibrit bir inverter tercih edilmiştir.

Tablo 5.3. Kullanılacak inverter performans değerleri (ürün etiketi).

İnverter Mode		AC Charger Mode	
Rated Power	5000W	AC Input	230V(AC), 50Hz, 36A
DC Input	48V(DC), 104A	DC Output	54V(DC), 10-60A
AC Output	230V(AC), 50Hz, 22A	AC Output	230V(AC), 50Hz, 22A
Solar Charger Mode			
Rated Current	50A		
System Voltage	48V (DC)		
Minimum Solar Voltage	36 V (DC)		
Maksimum Solar Voltage	105 V (DC)		

5.2. Evin Sıcak Su İhtiyacını Karşılacak Isı Pompası Tasarımı

Bu bölümde söz konusu evde kullanılacak çift serpantinli boylerin kapasitesi olan 500 litre sıcak suyu 50 °C'ye kadar sağlayacak ve PV sisteme entegre edilebilecek yani evaporatörü PV paneller olacak ısı pompasının teorik boyutlandırılması yapılacaktır. Tasarımı planlanan sistemin genel şeması Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi genel şeması

Tasarımı planlanan bu sistemde ısı pompası vasıtası ile PV panellerin yüzeyine gelen ısı enerjisinden faydalanılarak 500 litre su hacmine sahip çift serpantinli boylerin su sıcaklığının 50 °C'ye kadar artırılması planlanmaktadır. Bu durumda boylerin hacmi olan 500 litre suyu ısıtmak için gerekli olan ısı yükü, ısı pompasının kondenslerinden (yoğusturucusundan) çekilecek olan ısı yüküdür. Dolayısı ile bu ısı yükünü aşağıda verilen (5.7) eşitliğinden hesaplayabiliriz.

$$\dot{Q}_b = m_b * C_p * \Delta T \text{ (kj)} \quad (5.7)$$

Burada; $\dot{Q}_b$ boyler ısı yükünü, C_p suyun özgül ısısını ($C_p = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$), m_b boylerdeki su kütlesini ($m_b = 500 \text{ lt} = 500 \text{ kg}$), ΔT ise boylere giren ve çıkan su sıcaklıkları arasındaki farkı ifade etmektedir. $\Delta T = T_{\text{ç}} - T_g$ olmak üzere; $T_{\text{ç}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (boyler su çıkış sıcaklığı) ve $T_g = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ (şebeke suyu ortalama sıcaklığı) olarak kabul edilmiştir. Bu durumda kondenserden çekilmesi gereken günlük ısı yükü;

$$\dot{Q}_b = (500 \text{ kg}) * \left(\frac{4,19 \text{ kJ}}{\text{kg.K}} \right) * (50 - 14) \text{ K} = 75420 \text{ kJ} = 20,95 \text{ kWsaat olarak hesaplanır.}$$

Sistemden çekebileceğimiz ısı yükü PV panel yüzeyine, yani ısı pompasının evaporatörüne ısı sağlayan ve PV panellerin arka yüzeyinde iletim yolu ile ısı transferini gerçekleştiren bakır boru yüzey alanı ile güneşlenme sürelerine bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Tasarımın yapıldığı il olan Iğdır'a ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü güneşlenme sürelerinin aylık ortalama değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Iğdır ilinin aylık ortalama güneşlenme süreleri (MGM, 2023).

Ay	Günş. Süresi (saat)	Ay	Günş. Süresi (saat)	Ay	Günş. Süresi (saat)
Ocak	2,5	Mayıs	7,4	Eylül	8,5
Şubat	4	Haziran	9,5	Ekim	6
Mart	5,3	Temmuz	10,1	Kasım	4,2
Nisan	6,1	Ağustos	9,6	Aralık	2,5

Aylık ortalama güneşlenme sürelerine göre ısı pompasının yoğunlaştırıcısından çekilecek anlık ısı yükleri aylık ortalama olarak (5.8) eşitliğine göre hesaplanır.

$$\dot{Q}_y = \frac{\dot{Q}_b}{t_g * 3600 \text{ sn}} \text{ (kw)} \quad (5.8)$$

Bu eşitlikte; $\dot{Q}_b$ boyler ısı yükünü (75420 kJ olarak hesaplanmıştı), t_g Iğdır ilinin aylık ortalama güneşlenme süresini (saat, Tablo 5.3'ten) ifade etmek üzere; boylerin ihtiyaç duyduğu 20,95 kWsaat'lık enerjiyi sağlamak için tüm aylara ait yoğunlaştırıcudan ortalama anlık çekilecek ısı yükleri hesaplanıp Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Yoğuşturucudan çekilecek aylık ortalama anlık ısı yükleri

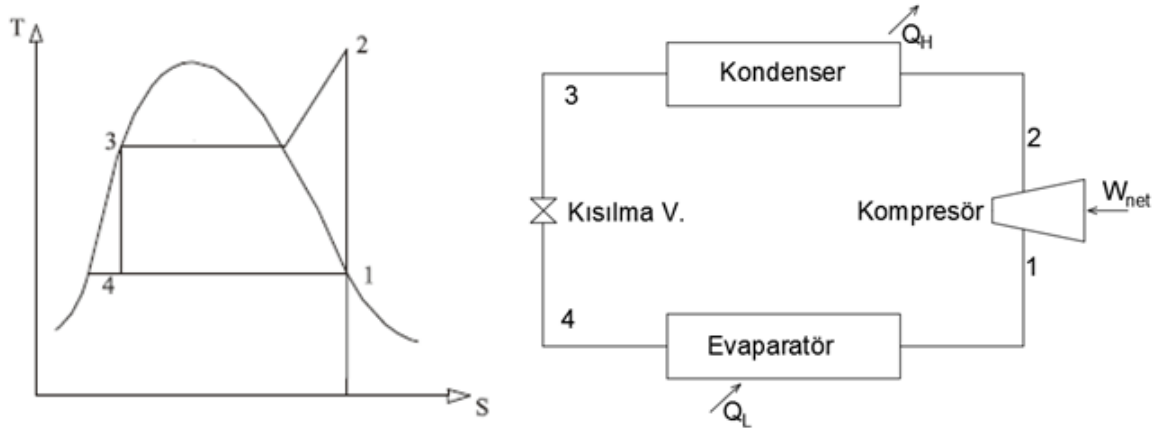
Ay	$\dot{Q}_y$ (kW)	Ay	$\dot{Q}_y$ (kW)	Ay	$\dot{Q}_y$ (kW)
Ocak	8,38	Mayıs	2,83	Eylül	2,46
Şubat	5,24	Haziran	2,21	Ekim	3,49
Mart	3,95	Temmuz	2,07	Kasım	4,99
Nisan	3,43	Ağustos	2,18	Aralık	8,38

Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R134a kullanılacağı varsayılarak bu soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri kullanılacaktır. Isı pompası sistemi ideal buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla buharlaştırıcı ile yoğuşturucudaki ısı geçişlerinde basınç kayıplarının olmadığı, genleşme vanasındaki sürecin adyabatik (izantropik) olduğu, kompresörün tersinir ve adyabatik olduğu, bütün bu elemanlar ile boru bağlantıları arasında herhangi bir basınç ve ısı kaybının olmadığı kabul edilmiştir. Hesaplamalarda sistem debisinin belirlenmesi için, bir yıllık anlık ısı yükü ortalaması değeri olan $\dot{Q}_{y.ort.} = 4,14$ kW (Tablo 5.5'in ortalaması) anlık ısı yükü referans alınmıştır. Bu referans değer ile Iğdır ilinin aylık ortalama güneşlenme süreleri dikkate alındığında aylara göre ısı pompasının üretebileceği ($\dot{Q}_ü$) enerji değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Isı pompası tarafından üretilebilecek aylık ortalama enerji değerleri

Ay	$\dot{Q}_ü$ (kWsaat)	Ay	$\dot{Q}_ü$ (kWsaat)	Ay	$\dot{Q}_ü$ (kWsaat)
Ocak	10,35	Mayıs	30,64	Eylül	35,19
Şubat	16,56	Haziran	39,33	Ekim	24,84
Mart	21,94	Temmuz	41,81	Kasım	17,39
Nisan	25,25	Ağustos	39,74	Aralık	10,35

Isı pompası sistemindeki soğutucu akışkan olarak kabul edilen R134a için sistemin termodinamik özellikleri ile şematik gösterimi Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Isı pompası sistemi ve T-s diyagramı

Tasarımını yaptığımız ısı pompası sisteminde kullanılacak olan R134a soğutucu akışkanının buharlaşabileceği en düşük sıcaklık olarak, Iğdır İline ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerinden alınan ocak ayına ait $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve yoğuşturucu sıcaklığı $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kompresör ile sıkıştırılma neticesinde $P_2 = 1200\text{ kPa}$ basınca ulaştığı kabul edilmiştir.

Sistemde kullanılacak olan R134a soğutucu akışkanın Şekil 5.2'de verilen T-s diyagramına göre; 1, 2, 3 ve 4 noktalarındaki termodinamik analizleri;

1-noktası:

1 noktasında doymuş buhar fazında bulunan ve sıcaklığı $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan R134a soğutucu akışkanın Ek-1'de verilen doymuş soğutucu akışkan 134a sıcaklık tablosundan entalpi; $h_g = h_1 = 245,72\text{ kJ/kg}$ olarak, doyma basıncı $P_1 = 217,08\text{ kPa}$ olarak ve doymuş buharın entropi değeri $s_1 = 0,93629\text{ kJ/(kg.K)}$ olarak okunur.

2-noktası:

2 noktasında kızgın buhar fazında bulunan R134a soğutucu akışkanın 1 noktası ile 2 noktasındaki entropi değerleri eşit olup (Şekil 5.2 T-s diyagramı) $s_1 = s_2 = 0,93629\text{ kJ/(kg.K)}$ 'dir. Dolayısı ile Ek-3'te verilen kızgın soğutucu akışkan 134a tablosundan $P_2 = 1200\text{ kPa}$ ve $s_2 = 0,93629$ değerleri için interpolasyon yöntemi ile $h_2 = 281,41\text{ kJ/kg}$ olarak bulunur. Yine 1200 kPa ve $s_2 = 0,93629$ değerleri için interpolasyon yöntemi ile R134a soğutucu akışkanın yoğuşturucudaki sıcaklığı olan $T_2 = 52,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunur.

3-noktası:

3 noktasında doymuş sıvı fazında bulunan R134a soğutucu akışkanın 2 noktası ile 3 noktasındaki basınç değerleri eşit olup ($P_2 = P_3 = 1200\text{ kPa}$) Ek-2'de verilen doymuş

soğutucu akışkan R134a basınç tablosundan $P_3 = 1200$ kPa için doymuş sıvının entalpisi olan $h_f = h_3 = 117,77$ kJ/kg şeklinde belirlenir.

4-noktası:

3 noktası için; $P_1 = P_4 = 217,08$ kPa ve $h_3 = h_4 = 117,77$ kJ/kg olduğunu biliyoruz.

Isı pompası boyutlandırma hesabı:

$\dot{Q}_{y.ort.} = 4,14$ kW (Tablo 5.4'ün ortalaması) anlık ısı yükü değerine göre kondenserden çekilecek ısı, denklem (5.9)'a göre hesaplanır. Burada $\dot{m}$ (kg/s) sistemdeki akışkan debisini ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{y.ort.} = \dot{Q}_{kond.} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (kW) \quad (5.9)$$

$$\dot{m} = \frac{4,14 \text{ kW}}{(281,41 - 117,77) \text{ kJ/kg}} = 0,0253 \text{ kg/s} \text{ olarak hesaplanır.}$$

Sistemde kullanılacak soğutucu akışkanın debisi hesaplandığına göre dolayısı ile evaporatörden çekilecek aylık ortalama anlık ısı da hesaplanabilir. Bu ısı ise aşağıda verilen (5.10) eşitliğine göre hesaplanabilir. Burada $\dot{Q}_{evap.}$ (kW), evaporatörden çekilecek anlık ısıyı ifade etmek üzere;

$$\dot{Q}_{evap.} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (kW) \quad (5.10)$$

$$\dot{Q}_{evap.} = 0,0253 * (245,72 - 117,77) = 3,24 \text{ (kW) olarak hesaplanır.}$$

Kompresör hesabı;

Isı pompası sisteminde kullanılacak kompresörü belirlemek için gerekli olan soğutucu akışkan debisi ile kompresör giriş ve çıkış noktalarındaki akışkanın entalpileri bilindiğinden kompresör için gerekli iş (5.11) denkleminden hesaplanabilir. Burada η_k kompresörün verimi olup 0,90 kabul edilmiştir.

$$\dot{W}_k = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\eta_k} \quad (kW) \quad (5.11)$$

$$\dot{W}_k = \frac{0,0253(281,41 - 245,75)}{0,9} \approx 1 \text{ (kW)} \text{ olarak hesaplanır.}$$

Isı pompası etkinlik katsayısı hesabı (COP_{ip});

Isı pompası sistemlerinde sistemin etkinlik katsayısı; eşitlik (5.12) de gösterildiği gibi kondenserden çekilen ısı kompresör gücüne oranlanarak hesaplanır. Dolayısı ile tasarımını yaptığımız ısı pompasının etkinlik katsayısı değeri;

$$COP_{ip} = \frac{\dot{Q}_{kond.}}{\dot{W}_k} \quad (5.12)$$

$$COP_{ip} = \frac{4,14}{1} = 4,14 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Kondenser (Yoğusturucu) yüzey alanı hesabı;

Isı pompasının kondenser ünitesinin yüzey alanı hesabı aşağıda verilen (5.13) eşitliği ile yapılabilir. Bu eşitlikte; $\dot{Q}_{y.ort.} = 4,14 \text{ kW}$ (denklem (5.8) ve Tablo 5.4'ün ortalamasına göre hesaplamıştık) yoğusturucudan çekilen anlık ortalama ısı, K toplam ısı transfer katsayısını ($\text{W/m}^2\text{K}$), A yüzey alanını (m^2) ve ΔT_m logaritmik ortalama sıcaklığı ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{y.ort.} = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (\text{kW}) \quad (5.13)$$

Utlu (1999), toplam ısı transfer katsayısı olan K değerinin buhar kazanlı yoğusturucular için ortalama olarak $600\text{-}1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığında olduğunu belirtmiştir. Buna göre K değeri $600 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak kabul edilmiştir.

ΔT_m logaritmik ortalama sıcaklık ise aşağıda verilen (5.14) eşitliği ile hesaplanır.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (\text{K}) \quad (5.14)$$

Burada; $T_{\text{ç}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (boylerdeki su çıkış sıcaklığı), $T_g = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ (şebeke suyu ortalama giriş sıcaklığı) olmak üzere, $\Delta T_1 = T_{\text{ç}} - T_g = 50 - 14 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ olur. $\Delta T_2 = 52,76 \text{ }^\circ\text{C}$ soğutucu

akışkanın kondenserdeki sıcaklığı olarak bulunmuştur. Eşitlik (5.14)'e göre logaritmik ortalama sıcaklık $\Delta T_m = 43,85$ (K) olarak hesaplanır. Eşitlik (5.13)'ten kondenser ünitesinin yüzey alanı $A = 0,16$ m² olarak hesaplanır.

Evaporatör (Buharlaştırıcı) yüzey alanı hesabı;

Isı pompasının evaporatör ünitesinin yüzey alanı hesabı, kondenser ünitesinin yüzey alanı hesabı için verilen (5.13) eşitliği ile yapılabilir. Burada; $\dot{Q}_{\text{evap.}} = 3,24$ (kW) evaporatörden çekilen anlık ısı (eşitlik (5.10)'da hesaplanmıştı), $\Delta T_1 = 36$ °C depo için $\Delta T_2 = 8$ °C soğutucu akışkanın evaporatördeki sıcaklığı olarak bulunmuştur. Eşitlik (5.14)'e göre logaritmik ortalama sıcaklık $\Delta T_m = 18,62$ (K) olarak hesaplanır.

Utlu (1999), toplam ısı transfer katsayısı olan K değerinin boru kazanlı ısı değiştiricilerde ortalama olarak 500-700 W/m²K aralığında olduğunu belirtmiştir. Buna göre K değeri 500 W/m²K olarak kabul edilmiştir. O halde evaporatör ünitesinin yüzey alanı $A = 0,35$ m² olarak hesaplanır.

5.3. Evin Yapımında Kullanılan Taşın (Andezitin) Özellikleri ve Hesaplamalar

Bu çalışmada Iğdır ilinde bulunan; Büyük ve Küçük Ağrı Dağları'nın volkanlarından çıkan volkanik malzemenin soğuyup sertleşmesiyle piroklastik bir kayaç türü olan andezitik tüflerden oluşan doğal taşların kullanımı planlanıp görünümü Resim 5.1'de verilen ev tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.1. Yapımı planlanan evin üç boyutlu tasarımı

Söz konusu evin yapımında yörenin iki farklı kotuna sahip noktalarda yer altında çıkarılan tüf piroklastik malzeme kullanılmıştır ve kullanılan malzemenin görünümü Resim 5.2'de verilmiştir. Piroklastik malzeme; volkanik patlama ve erüpsiyonla oluşan malzemenin kırıntı ürünlerle birlikte tümüyle sıkışması sonucu oluşmaktadır. Bu taşlar; yoğunlukları düşük, mukavemetleri yüksek, kolay biçim verilebilen ve fevkalade izolasyon

malzemesi özelliğine haiz oldukları için dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de yapıtaşı olarak kullanılmaktadır.



Resim 5.2. Söz konusun evin yapımında kullanılan taşlar

Bu çalışmada Iğdır yöresinin iki farklı kotuna sahip noktada yer altında çıkarılan malzemelerden, evin imalatından önce laboratuvar ortamında ısı iletkenlik katsayıları belirlenmek üzere numuneler alınarak hazırlandı. Bu numunelerden yörenin yüksek kotunda çıkarılan malzemeden olanlar Y1, Y2 ve Y3 olarak, daha aşağıdaki kotta çıkarılanlar ise A1, A2 ve A3 olarak isimlendirilip laboratuvar ortamında ısı iletkenlik katsayıları ölçtürüldü. Numuneler laboratuvara gönderilmeden önce fiziksel olarak inceleme neticesinde yörenin aşağı kotunda çıkarılan malzemelerin daha hafif, gözenekli ve kolay işlenebilir oldukları, yukarı kotta çıkarılan malzemelerin ise daha sert, kırılğan ve ağır oldukları gözlemlendi. Bu andezitik malzemelerin oluşum sıcaklıklarının, oluştukları bölgenin iklim şartlarının, yapılarındaki gözenek (boşluk) yoğunluğu ile gözenek büyüklüklerinin farklı olması ve çıkarıldıkları noktaların kot farkları nedeniyle ısı iletkenlik değerlerinin de birbirinden farklı olacağı öngörülmüştür.

Resim 5.3'te hazırlanan numunelerin görünümü verilmiştir. Her bir numune için beşer ölçüm yapıp bu ölçümlerin ortalaması alınarak her numune için bir ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir.



Resim 5.3. Doğal taş numuneleri

Numunelere ait ölçüm sonuçlarını gösteren tablo aşağıda, laboratuvar test analiz raporu ise Ek-4'te verilmiştir.

Tablo 5.7. Numunelerin laboratuvar ölçüm sonuçları

Numune	Ölçüm	A1 k(W/mK)	A2 k(W/mK)	A3 k(W/mK)	Y1 k(W/mK)	Y2 k(W/mK)	Y3 k(W/mK)
Ölçüm 1		0,296	0,278	0,323	0,527	0,628	0,567
Ölçüm 2		0,301	0,282	0,325	0,531	0,630	0,566
Ölçüm 3		0,301	0,280	0,326	0,535	0,630	0,568
Ölçüm 4		0,302	0,282	0,328	0,531	0,632	0,571
Ölçüm 5		0,300	0,281	0,326	0,534	0,634	0,568
Ortalama Değer		0,300	0,281	0,326	0,532	0,631	0,568

Tablo 5.7'den de görüleceği üzere yörenin aşağı kotunda çıkarılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının yukarı kottan çıkarılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarına oranla önemli derecede düşük oldukları ölçülmüştür. Buda; iki farklı noktada çıkarılan malzemelerin fiziksel olarak incelenmesi sonucu, aşağı kotta çıkarılan malzemelerin düşük yoğunlukta ve gözenekli yapıya sahip olmalarından kaynaklandığını göstermektedir.

Bu çalışmada; herhangi bir yalıtım malzemesi kullanılmadan sadece söz konusu taşların karışımından yani yukarı kotta çıkarılanlarla aşağı kotta çıkarılanların birlikte kullanılması durumunda en düşük duvar kalınlığının ne kadar olacağı incelenmiştir. Daha

sonra her iki kotta çıkarılan taşların ayrı ayrı kullanılması durumunda en düşük duvar kalınlığının ne kadar olacağı hesaplanmıştır (Şekil 5.4). Bu duvar kalınlıklarının hesaplanmasında İZODER TS 825 programı kullanılmış olup malzeme olarak gözenekli püskürük taş seçilmiştir. Bu malzemenin ısı iletkenlik katsayısı olarak önce; laboratuvar ölçüm sonuçları Tablo 5.4'ün ortalaması olan 0,439 W/mK değeri olarak kullanılmıştır. İZODER TS 825 programında bölge olarak Iğdır seçilmiş olup 3.Bölgede yer alan Iğdır için dış hava temaslı bir duvar için tavsiye edilen ısı geçirgenlik katsayısı $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir (Şekil 5.6).

Tavsiye Edilen U Değerleri

BÖLGE	U Duvar	U Tavan	U Taban	U Pencere
1. Bölge	0,7	0,45	0,7	2,4
2. Bölge	0,6	0,4	0,6	2,4
3. Bölge	0,5	0,3	0,45	2,4
4. Bölge	0,4	0,25	0,4	2,4

Alan : 108,52 U Değeri : 0,496

☐ Dış cephede havalandırılan hava boşluğu ve dış cephe kaplaması var.

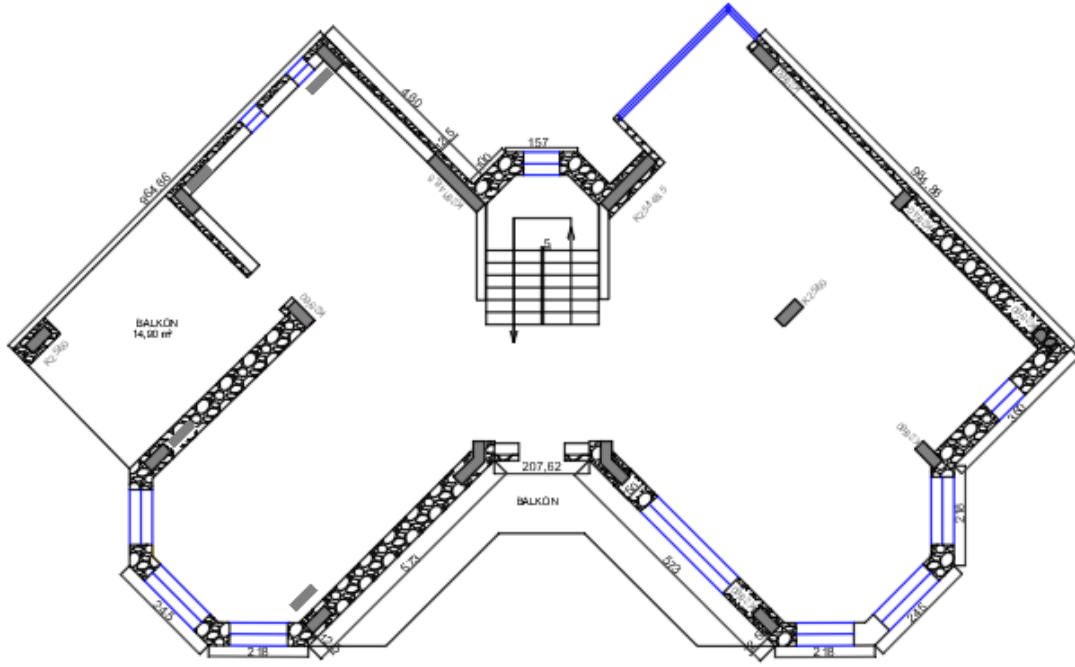
Hesaplama Katılacak Malzemeler

Liste Adı : TAŞ D.(Tamamen) 2

No	d(m)	Malzemenin Cinsi veya Bileşenin Çeşidi	Isıl İletkenlik Hesap	μ
1	0,81	(*) Doğal Taş/Andezitik (Gözenekli püskürük taşlar)	0,439	15

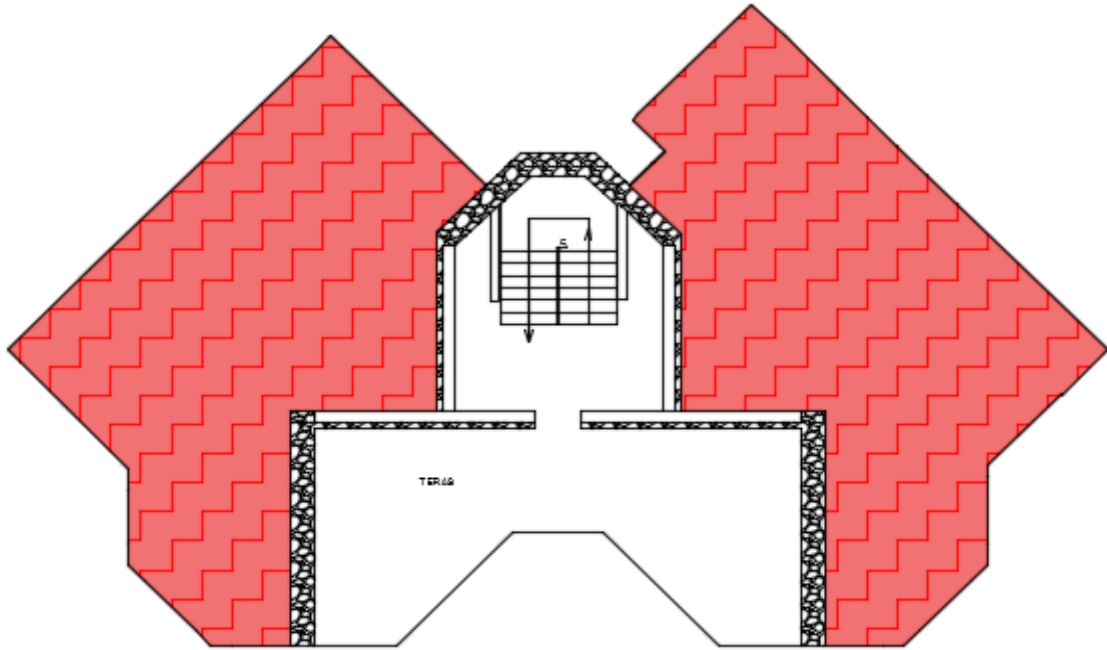
Şekil 5.6. En düşük duvar kalınlığı

İZODER TS 825 programında bu verilere göre; her iki kotta çıkan taşların birlikte kullanılması durumunda en düşük taş duvar kalınlığının 81 cm olması gerektiği hesaplanmıştır (Şekil 5.7-a.) . Daha sonra aynı işlem, bölgenin aşağı kotundan çıkarılan A1, A2 ve A3 numunelerinin laboratuvar ortamından ölçülen ısı iletkenlik katsayılarının ortalaması olan 0,302 W/mK değerinin kullanılması durumunda en düşük taş duvar kalınlığının 56 cm olması gerektiği hesaplanmıştır (Şekil 5.7-b.) . Aynı işlem yörenin yukarı kotunda çıkarılan Y1, Y2 ve Y3 numunelerinin laboratuvar ortamında ölçülen ısı iletkenlik katsayılarının ortalaması olan 0,577 W/mK değerinin kullanılması durumunda en düşük taş duvar kalınlığının 106 cm olması gerektiği hesaplanmıştır (Şekil 5.7-c.) .



Şekil 5.9. Taş evin normal kat planı

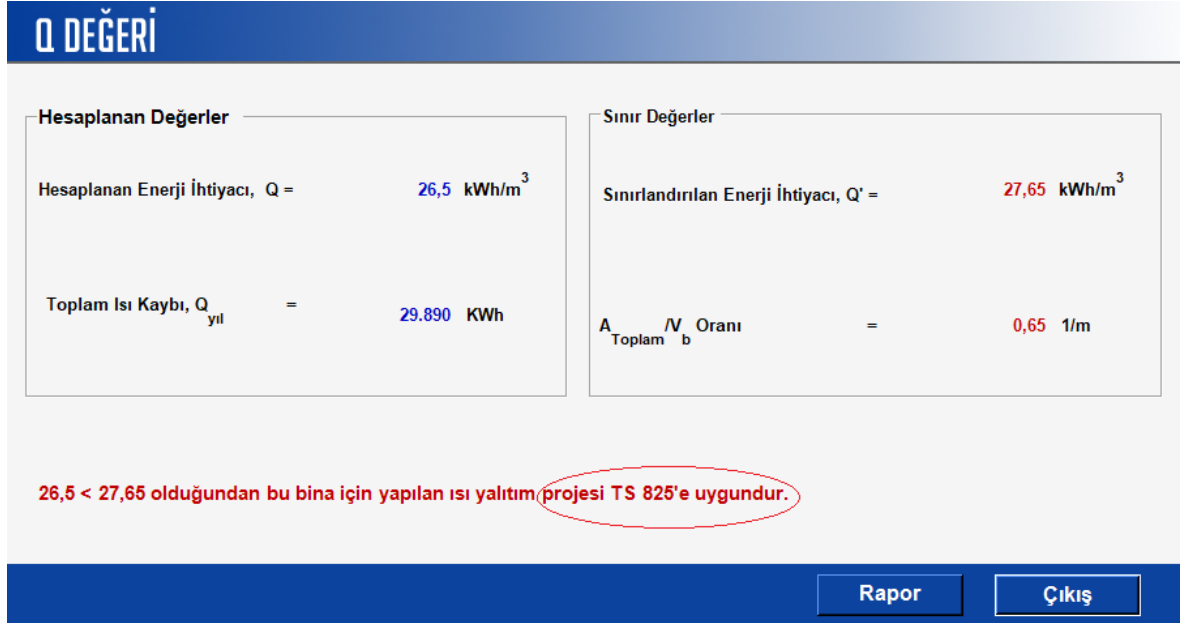
Evin TS 825 ısı yalıtım standartlarına sahip olup olmadığını hesaplariken; yapının dış havaya temas eden duvarları ile tavan, taban, dış kapı ve pencere bileşenleri dikkate alınmıştır.



Şekil 5.10. Taş evin çatı kat planı

Daha sonra söz konusu evin; sırası ile Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'daki kat planlarına göre yapı bileşenleri oluşturularak bu bileşenler TGÜB (Türkiye Gaz Beton

Üreticileri Birliği) ısı yalıtım programına yüklenip tasarımın TS 825 ısı yalıtım standartlarına sahip olup olmayacağı hesaplatılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Evin ısı yalıtım standartlarına uygunluğu

TGÜB ısı yalıtım programına proje verilerinin yüklenip program çalıştırıldığında söz konusu evin TS 825 standartlarına uygun olduğu görülmüştür (Şekil 5.8). TGÜB ısı yalıtım programından elde edilen “Binanın Özgül Isı Kaybı Hesabı” çizelgesi (EK-5), dış hava temaslı duvarlar ile taban ve tavanlara ait “Yapı Elemanının Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi” (EK-6) ve “Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacı” belgesi (EK-7) eklerde verilmiştir. Dolayısıyla Iğdır yöresinde çıkarılan doğal taşın; konut imalatı için kullanılabilir bir yapı malzemesi olduğu, gerekli projelendirme yapıldığında (örneğin 56 cm duvar kalınlığına sahip sadece bu malzemeden kullanılması durumunda) herhangi bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmadan tek başına da yeterli olabileceği görülmüştür. Resim 5.1’e göre tasarımı yapılan evin imalat sonrası görünümü Resim 5.3’te verilmiştir.

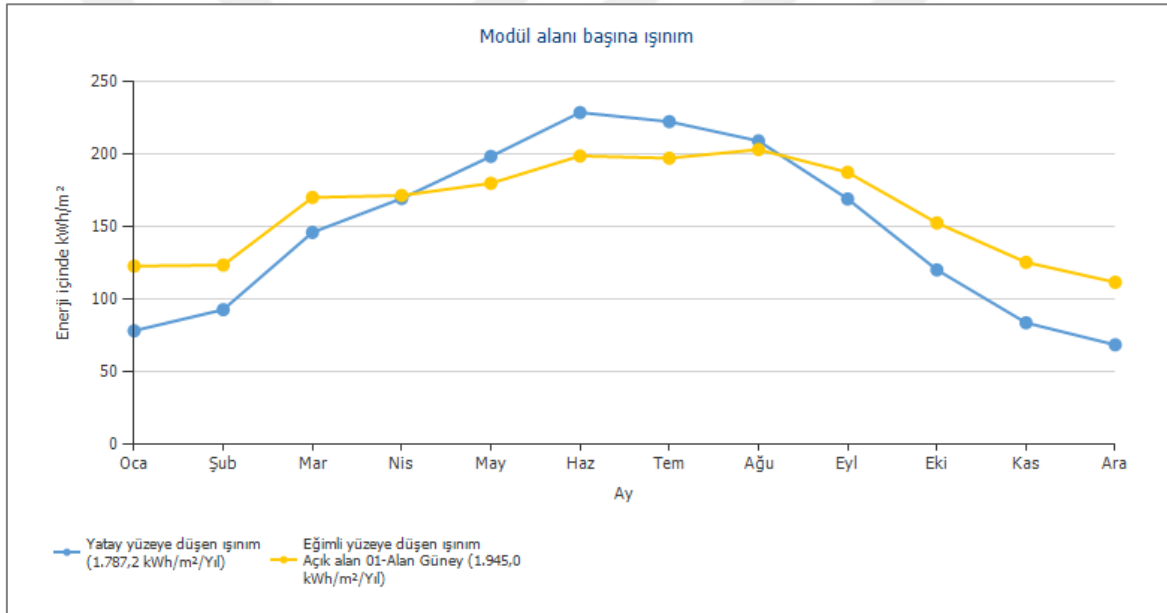


Resim 5.4. Evin imalat sonrası görünüm

6. BULGULAR

6.1. Tasarımı Yapılan PV Sistemin Analizi

PV sistem için ortalama bir evde kullanılabilecek cihazlar ve günlük çalışma süreleri referans alınarak söz konusu evin günlük ihtiyaç duyduğu enerji 16330 Wh/gün olarak hesaplanmıştır. Evin yapılacağı yer şebekeden uzak bir konumda olduğundan PV sistemi şebekeden bağımsız (off grid) olarak tasarlanmıştır. PV*SOL programı yardımıyla; PV sistemin kurulacağı lokasyonun iklim verileri ile panel eğimi ve sistem açısı parametrelerinin birlikte simüle edilmesiyle elde edilen modül alanı başına ışıınım grafiği Şekil 6.1 'de verilmiştir.

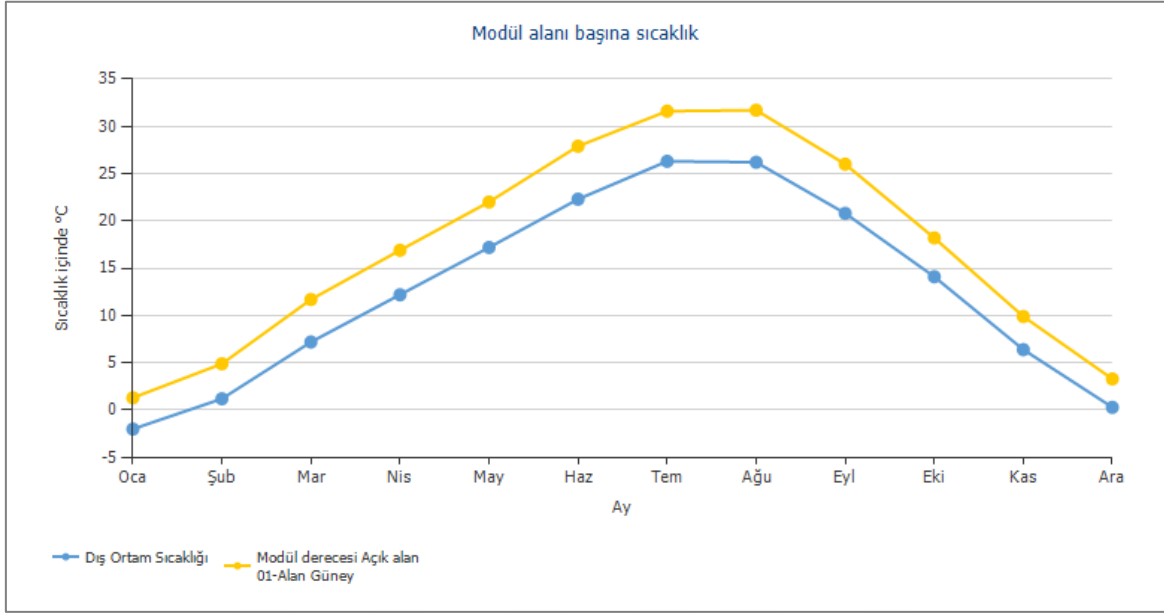


Şekil 6.1. Modül başına ışıınım grafiği

Grafikten de anlaşılacağı üzere; PV*SOL programı yardımı ile gerçekleştirilen simülasyon neticesinde belirlenen panel açısının optimum değerde olduğu görülmektedir. Optimize edilen bu panel eğimleri sayesinde sistemin, 8 ay kadar bir süre boyunca güneşten gelen ışıınımlardan daha verimli faydalanacağı anlaşılmaktadır. Grafiğe göre söz konusu lokasyonda nisan, mayıs, haziran ve temmuz aylarında paneller daha yatay bir açı ile konumlandırılırsa sistemin panel yüzeylerine gelen ışıınımdan faydalanma oranı artacaktır.

Yine sistemin kurulacağı bölgenin PV*SOL programı veri tabanındaki iklim verilerinin simülasyonu neticesinde elde edilen modül alanı başına sıcaklık grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir. Bilindiği üzere PV sistemlerde panel sıcaklığının yükselmesi ile

verimlerinde düşüşler meydana gelmektedir. Grafiğe göre modül sıcaklıkları aylık ortalama olarak 5 °C çevre sıcaklığından daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile bölgede kurulacak PV sistemler yerine PV/T sistemlerin tercih edilmesi verimi daha da arttıracaktır.



Şekil 6.2. Modül alanı başına sıcaklık grafiği

Akü, panel ve inverter verimleri göz önünde bulundurularak PV sistemin verimi $\eta_{sis} = 0,69$ olarak hesaplanmıştır. Verimlerinin polikristal ve ince film panellere göre daha yüksek olması sebebiyle bu çalışmada 400W gücündeki monokristal paneller tercih edilmiştir. Evin ihtiyaç duyduğu 16330 Wh/gün olan enerji sağlayacak panel sayısı (PS) ; günlük ihtiyaç duyulan elektrik miktarı ($E_{gün.ih.}$) 16330 Wh/gün, Iğdır ilinin günlük güneşlenme süresi ($t_{g.s}$) 6,3 h/gün, bir panelin gücü (G_p) 400Wh ve sistem verimi (η_{sis}) 0,69 verileri göz önünde bulundurularak PS= 10 adet olarak hesaplanmıştır. PV sisteminde kullanılan panellerin görünümü Resim 6.1’de verilmiştir.



Resim 6.1. Uygulanması gerçekleştirilen sistemde kullanılan panellerin görünümü

Bu evin elektrik ihtiyacının akü ile sağlanacağı zamanı 1 gün, akü akım ve voltaj değerleri ile deşarj ve akü sıcaklık katsayısı dikkatte alıp bunun için gerekli akü sayısı $AS = 8$ adet olarak hesaplanmıştır. Sitemde 8 adet 12v 100A jel akü kullanılmıştır (Resim 6.2-b).



Resim 6.2. Kurulumu yapılan sistemin ekipmanları

Panellerin maksimum güç akımlarını, panel sayısını ve şarj kontrol cihazının giriş akımını göz önünde bulundurarak gerekli olan şarj kontrol cihazı sayısı $\$.K.S = 1,65 \approx 2$ adet olarak hesaplanmış olup sistem 60A giriş akımına sahip şarj kontrol cihazları tercih edilmiştir (Resim 6.2-c).

PV panellerden üretilen enerji doğru akım olup, elektriksel cihazları çalıştırabilmesi için alternatif akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşümü yapacak inverter kapasitesi panel gücü ve sayısına bağlı olarak 4000 W hesaplanmıştır. Sistemde ise daha sonra yapıla bilinecek güç artırımı veya hibrit uygulamalar için 5000 W kapasiteli hibrit bir inverter tercih edilmiştir (Resim 6.2-a).

Ekonomik Analiz

PV sisteminin kurulumunda kullanılan tüm ekipman ve işçilik maliyetleri Tablo 6.1’de detaylandırılmıştır.

Tablo 6.1. PV sistem kurulum maliyeti çizelgesi

S.	Ekipman /İş	Birimi	Miktarı	Birim F. (KDV’li)	Tutarı (₺)
1	400 W Kapasiteli monokristal panel	Adet	10	4.080,00	40.800,00
2	12V, 100A Jel akü	Adet	8	4.010,00	32.080,00
3	5000W, Hibrit inverter	Adet	1	16.071,91	16.071,91
4	60A, Şarj kontrol cihazı	Adet	2	1.224,25	2.448,50
5	Kablolama(Elk. ekipman) + İşçilik	Adet	1	12.000,00	12.000,00
6	Konstrüksiyon malzemeleri	Adet	1	5.000,00	5.000,00
7	Nakliye ve diğer giderler	Adet	1	3.000,00	3.000,00
Toplam Maliyet					111.400,41 ₺

Söz konusu evde kullanılacak elektriksel ev aletleri ile günlük tüketim değerleri Tablo 5.1’de verilmişti. Bu tabloya göre evin günlük toplam tüketim değerini $E_{gün.ih.} = 16,33 \text{ kWh/gün}$ olarak hesaplamıştık. Bu tüketimi, PV sistem olmama durumunda yani şebekeden karşılanması halinde yıllık fatura bedelini (6.1) eşitliğine göre hesaplırsak;

$$T_{yillik} = E_{gün.ih.} * 365 * t_{d.şirkt.} \quad (6.1)$$

$T_{yillik} = 16,33(\text{kWh/gün}) * 365 \text{ gün} * 1,6425(\text{₺/kWh}) = 9.790,03 \text{ ₺}$ olarak hesaplanır. Burada $t_{d.şirkt.} = 1,6425(\text{₺/kWh})$ Iğdır ilinde elektrik dağıtım şirketinin (Aras Elektrik Parakende Satış A.Ş.) 24.11.2023 tarihli tarifesini göstermektedir.

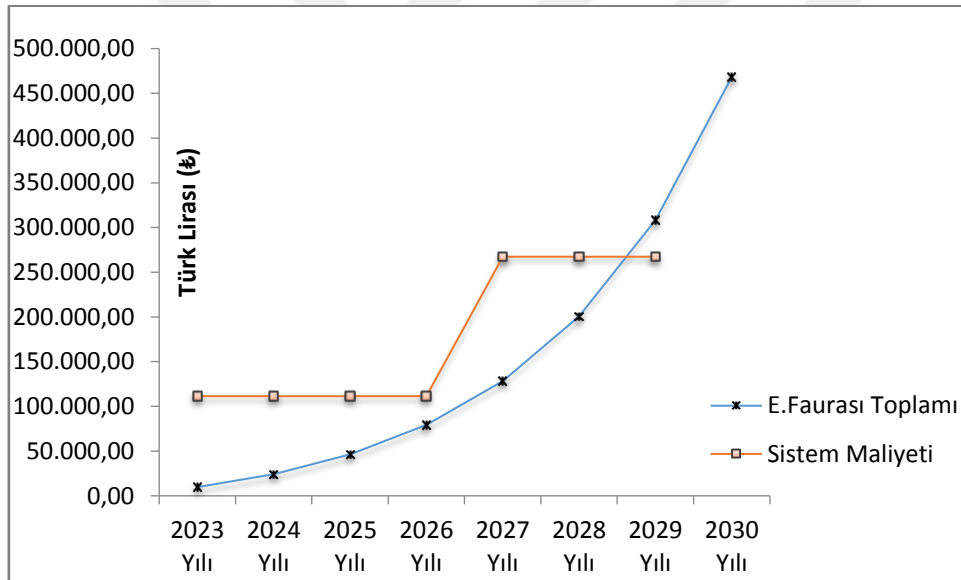
2023 yılı itibarı ile PV sisteminin toplam ilk yatırım maliyetinin 111.400,41 ₺ olduğu görülmektedir (Tablo 6.1). TÜİK’in 24.12.2023 tarihli verilerine göre 2023 yılının (Aralık ayı hariç) ortalama enflasyon oranının %48.48 olduğu ve diğer yıllarda da enflasyon oranı aynı kabul edilmiştir. Bu değer ve oranlara göre; PV sistem ile PV’siz yani güneş enerjisi kullanılmadan şebekeden elektrik ihtiyacının sağlanması durumlarında maliyet karşılaştırma çizelgesi Tablo 6.2’de verilmiştir.

Ayrıca sistemdeki akülerin her beş yılda bir enflasyon oranında yerine yenilerinin alındığı varsayılarak yapılan amorti grafiği Şekil 6.1’de verilmiştir. Dolayısıyla beş yılda bir yeni akü fiyatları sistem maliyetine eklenerek toplam sistem maliyeti güncellenmiştir.

Tablo 6.2. PV sistem ile sadece şebekeli sistem maliyet karşılaştırma çizelgesi

S.	Yıllar	PV Sistem Maliyeti (₺)	Akü Maliyeti (₺)	E. Fatura Toplamları (₺)
1	2023	111.400,41	32.080,00	9.790,03
2	2024	111.400,41	0,00	24.326,27
3	2025	111.400,41	0,00	46.480,65
4	2026	111.400,41	0,00	79.375,49
5	2027	267.321,98	155.921,57	128.217,74
6	2028	267.321,98	0,00	200.738,71
7	2029	267.321,98	0,00	308.417,85
8	2030	267.321,98	0,00	468.299,84

Şekil 6.3'teki grafiğe göre tasarımı yapılan PV sistemi, kurulumu yapıldıktan sonra yaklaşık olarak 6. yılda kendisini amorti edeceği öngörülmektedir.



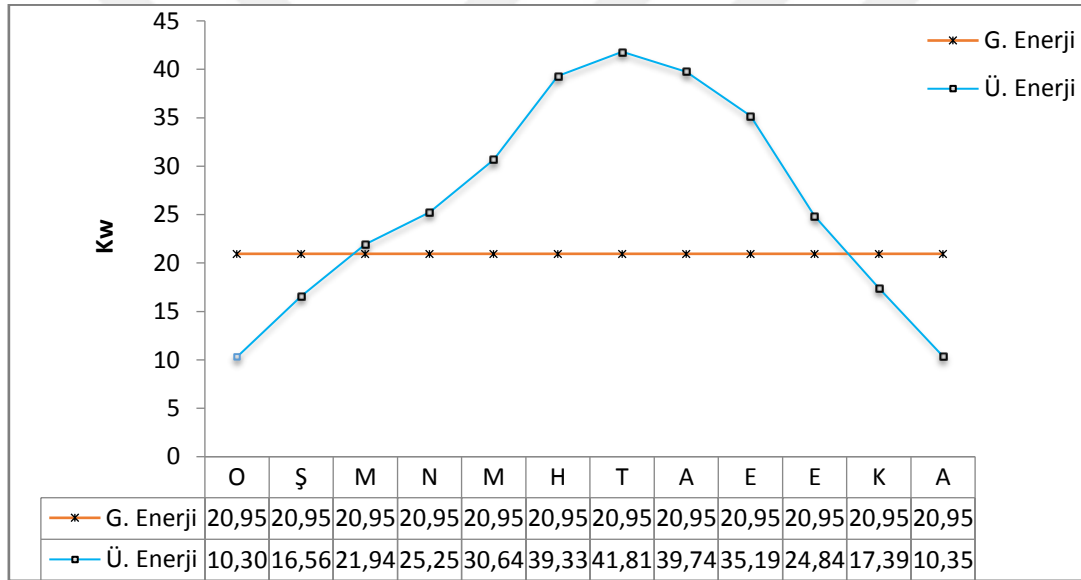
Şekil 6.3. PV sistemin amorti grafiği

6.2. Tasarımı Yapılan Isı Pompasının Analizi

Evaporatörü PV paneller olarak tasarlanan ısı pompası sisteminin yoğuşturucusundan çekilecek olan ısı yükü, imalatı gerçekleştirilen evin günlük sıcak su ihtiyacı olan 500 lt kapasiteye sahip çift serpantinli boylerdeki suyu 50°C'ye çıkaracak olan ısı yükü $\dot{Q}_b = 75420$ kJ olarak hesaplanmıştır. Aylık ortalama güneşlenme sürelerine göre ısı pompasının yoğuşturucusundan çekilecek anlık ısı yükü aylık ortalama $\dot{Q}_{y.ort.} = 4.14$ kW olarak hesaplanmıştır. Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R134a kullanılacağı

varsayılarak termodinamik bağıntılardan soğutucu akışkanın debisi $\dot{m} = 0,0253 \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır. Bu debi değerine bağlı olarak ısı pompası sisteminin evaporatöründen yani PV panellerden çekilmesi gereken ısı yükü $\dot{Q}_{\text{evap.}} = 3,24 \text{ kW}$ olarak hesaplanmıştır.

Sistemin yoğuşturucusundan çekilmesi gereken ısı yükü yıllık ortalama hesaplanıp $\dot{Q}_{\text{y.ort.}} = 4.14 \text{ kW}$ bulunmuştur. Ancak aylara göre Iğdır ilinin günlük güneşlenme süresi ile güneşlenme şiddeti farklılık arz edeceği için bu değer her ay için farklı olacaktır. Bu nedenle özellikle kış ayları için ısı pompası sisteminden boylere aktarılabilecek ısı miktarı ile PV panellerden çekilecek ısı miktarı arasında farklar ortaya çıkacaktır. Bu farkları sistem karşılayamayacağı için ek ısıtıcıya ihtiyaç duyulacaktır. Şekil 6.4'te verilen grafikte sistemin yoğuşturucusundan üretilen enerji ile gerek duyulan enerjinin aylara göre dağılımı verilmiştir.

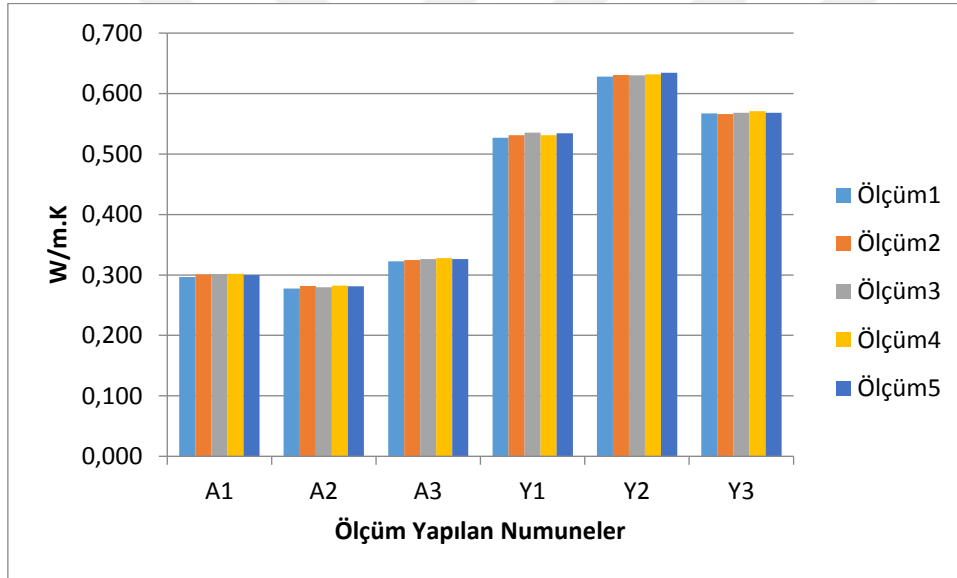


Şekil 6.4. Isı pompası sisteminde üretilen ve gerek duyulan enerji dağılım grafiği

Grafığe göre ocak, şubat, kasım ve aralık ayları hariç tasarımı yapılan ısı pompası evin ihtiyaç duyduğu sıcak suyu karşılayabilmektedir. Ancak bu aylarda ısı pompası gerek duyulan enerjiyi tamamen sağlayamadığından aradaki enerji farkını kapatabilecek ek ısıtıcıya ihtiyaç duyulacaktır. Bu aylardaki enerji farkları ise ocak ayı için 10,65 kWh, şubat ayı için 4,39 kWh, kasım ayı için 3,56 kWh ve aralık ayı için 10,60 kWh olarak hesaplanmıştır. Gerek duyulan ek ısıtıcı hesabından bu değerlerden en yükseği olan ocak ayı için 10,65 kWh değeri referans alınmalıdır.

6.3. Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Doğal Taşın Analizi

Tasarımı yapılan evin yapımında Iğdır yöresinde yer altından çıkarılan piroklastik bir kayaç türü olan andezitik tüflerden oluşan doğal taşlar kullanılmıştır. Bu malzemenin tercih edilme nedeni; taş işçiliği bakımında estetik görünümünün yanı sıra kolay şekil verilebilir olması ve yer altında çıkarılma ile nakliyesi hariç herhangi bir maliyetinin olmamasıdır. Yörenin birbirinden farklı iklimsel özellikler gösteren iki bölgesinden çıkarılan doğal taşlar evin yapımında kullanıldı. Söz konusu evin imalatına başlanmadan önce; kullanılacak doğal taşlardan elde edilen numunelerin, Eskişehir Teknik Üniversitesi'ne bağlı Seramik Araştırma Merkezi AŞ'nin laboratuvarında ısı iletkenlik katsayıları tespit edildi (EK-4). Numune olarak her iki kot için üçer numune hazırlandı ve her numune için laboratuvar da beşer ölçüm yaptırılarak bu ölçüm sonuçlarının ortalaması alındı.



Şekil 6.5. Isı iletkenlik katsayı tespiti yapılan numunelere ait ölçüm grafiği

Grafiğe göre yörenin aşağı kotunda çıkarılan malzemenin ısı iletkenlik katsayısı açısından yukarı kotta çıkarılan malzemeye nazaran daha düşük olduğu dolayısıyla ısı yalıtımı bakımından daha tercih edilebilir olduğu anlaşılmıştır. Fiziksel açıdan da aşağı kotta çıkarılan malzemelerin daha hafif ve taş işçiliği açısından kolay işlenebilir olduğu anlaşılmıştır. Yörenin aşağı kotunda çıkarılan malzemenin ısı iletkenlik katsayısının (A1, A2 ve A3 numunelerinin ortalaması), yukarı kotta çıkarılan malzemenin (Y1, Y2 ve Y3 numunelerinin ortalaması) ısı iletkenlik katsayısının %52.34'ü kadar olduğu ve bu farkında ısı yalıtımında önemli bir oran olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca Şekil 6.5'teki grafiğe göre yörenin aşağı kotunda çıkarılan doğal taşların ısı iletkenlik katsayısı bakımından yukarı kotta

Çıkarılan taşlara göre daha istikrarlı olduğu görülmüştür. Her iki kotta çıkarılan doğal taşların fiziksel ve deneysel ölçümlerinin birbirilerinden farklılık göstermesi, her iki noktanın farklı iklim şartlarına sahip olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Örneğin farklı sıcaklık ve basınçta malzemenin soğuma hızı ve oluşum şekli farklılık arz edebilir



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle, Iğdır ilinde doğal taş kullanılarak yapımı planlan bir evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini karşılayacak PV sistemin önce teorik hesaplamaları ve analizleri ardından da kurulumu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu evin günlük kullanım sıcak su ihtiyacı olan 500 lt suyun ısıtılmasını sağlayacak ve PV sistemine entegre edilebilecek ısı pompasının teorik tasarımı ile analizi yapılmıştır. Böylece PV sistemin, PV/T sistemine dönüştürülebilme durumu incelenmiştir. Son olarak Iğdır yöresinde yer altından çıkarılan ve söz konusu evin yapımında kullanılan; piroklastik bir kayaç türü olan andezitik tüflerden oluşan doğal taşların laboratuvar ortamında ısı iletkenlik katsayıları ölçtürülmüştür. Bu ısı iletkenlik katsayılarına göre TS 825 ısı yalıtım standartlarını sağlayacak yapı bileşenleri oluşturularak evin yapımında bu taşlar kullanılmıştır. Ayrıca yörenin farklı iki noktasında çıkarılan bu doğal taşların; herhangi bir yalıtım malzemesi kullanılmadan, ayrı ayrı ve birlikte kullanılması halinde olabilecek en düşük duvar kalınlıkları belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Tasarımı yapılan evin ihtiyaç duyduğu günlük elektrik enerjisi 1633 Wh/gün olarak tespit edilmiştir. Verimleri polikristal ve ince film panellere göre daha yüksek olmaları nedeni ile bu enerjiyi sağlayacak paneller, monokristal panel seçilip kapasitelerine (400W) göre gerekli panel sayısı 10 adet olarak hesaplanmıştır. Bu evin 1 günlük enerji ihtiyacını karşılayacak 12V ve 100Ah kapasiteli akü sayısı 8 adet olarak hesaplanmıştır.
- ✓ PV panellerden elde edilen doğru akımı (DC), alternatif akıma (AC) dönüştürebilecek inverter kapasitesi 4000W olarak hesaplanmıştır. Ancak sisteme daha sonra rüzgâr enerjisinin de hibrit olarak uygulanabilmesi için 5000W kapasiteli hibrit bir inverter kullanılmıştır.
- ✓ Sistemde kullanılan panellerin sayısı ile bu panellerin maksimum güç akımı dikkate alınarak gerekli olan şarj kontrol cihazı sayısı 2 adet olarak hesaplanmıştır.
- ✓ PV*SOL programının veri tabanında yer alan, sistemin kurulduğu noktanın 1996-2015 yılları arasındaki iklim verilerinin kullanılarak tasarımı yapılan sistemin gölge analizi simülasyonu neticesinde, panel başı minimum %0.9 ve maksimum %1.4 gölgelenme olabileceğine ulaşılmıştır.

- ✓ PV*SOL programı yardımı ile kurulacak PV sisteminin optimum açısı 190° ve optimum panel eğimi ise 30° olarak belirlenmiştir. Bu hesaplamalar ve PV*SOL programının simülasyon verilerine göre evin PV sistemi kurulup istenilen enerji elde edilmiştir.
- ✓ PV sistemin yapılan maliyet analizinde; her 5 yılda bir akülerin yenileneceği kabul edilerek ve bölgedeki elektrik dağıtım şirketinin fiyat endeksi ile enflasyon verileri baz alındığında sistemin kendisini 6. yıldan sonra amorti edeceği sonucuna varılmıştır.
- ✓ PV sisteme entegre edilerek sistemin, PV/T sistemine dönüştürülebileceği ısı pompasının tasarımı ve teorik hesaplamaları yapılmıştır. Söz konusu ısı pompasının özellikle yaz aylarında panellerden meydana gelen sıcaklık artışlarını engelleyerek, PV modül verimlerinin artışına katkı sağlayacağı anlaşılmıştır. Isı pompası sisteminin evaporatörü PV paneller olacak şekilde sistem dizayn edilmiştir.
- ✓ Isı pompası sistemi ile evin ihtiyaç duyduğu 500 lt'lik sıcak su ihtiyacının, şebeke suyunun sıcaklığının 14°C 'den 50°C 'ye çıkarmak sureti ile Aralık, Kasım, Ocak ve Şubat ayları haricindeki diğer aylarda karşılanabileceği hesaplanmıştır. Kış aylarında ise ihtiyaç duyulan sıcak su ihtiyacının ancak ek bir ısıtıcı yardımı ile sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.
- ✓ Soğutucu akışkan olarak R134a kullanılması planlanan ısı pompası sisteminde gerekli kompresör gücü 1 kW olarak hesaplanıp, ısı pompası sisteminin etkinlik katsayısı $\text{COP}_{\text{IP}} = 4.14$ olarak elde edilmiştir.
- ✓ Tasarımı yapılan ısı pompasının ihtiyaç duyduğu kondenser yüzey alanı ile evaporatör yüzey alanları sırası ile $0,16 \text{ m}^2$ ve $0,35 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Evaporatörü PV paneller olacak şekilde tasarımı yapılan ısı pompası için mevcut panellerden yeteri kadar alanın olduğu görülmüştür.
- ✓ Iğdır yöresinin farklı iki noktasında yer altında çıkarılan ve evin yapımında kullanılan; piroklastik bir kayaç türü olan andezitik tüflerden oluşan doğal taşların, laboratuvar ortamında ölçülen ısı iletkenlik katsayılarının $0,278 \text{ W/mK}$ ile $0,634 \text{ W/m.K}$ aralığında değiştiği görülmüştür. Bu ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin aynı noktadan çıkarılan numunelerde bir birine yakın oldukları ölçülmüştür. Ancak farklı kotlarda çıkarılan numunelerin ısı iletkenlik katsayıları arasında % 52.34 kadar çıkan farkın olduğu görülmüştür.

- ✓ Farklı kotlarda çıkarılan doğal taşların ısı iletkenlik katsayısı haricinde fiziksel olarak ta farklı oldukları gözlemlenmiş olup aşağı kotta çıkarılan malzemelerin daha hafif ve daha işlenebilir, ısı iletkenlikleri bakımından daha tercih edilebilir oldukları görülmüştür.
- ✓ Ayrıca herhangi bir yalıtım malzemesi kullanılmadan sadece söz konusu taşların karışımından yani yukarı kotta çıkarılanlarla aşağı kotta çıkarılanların birlikte kullanılması durumunda en düşük duvar kalınlığının 81cm olacağı hesaplanmıştır. Her iki kotta çıkarılan taşların ayrı ayrı kullanılması durumunda; aşağı kottaki malzemelerde 56 cm ve yukarı kottaki malzemelerde 106 cm en düşük duvar kalınlığı olacağı hesaplanmıştır.

Burada sıralanan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere; ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin amaçlandığı gibi yenilenebilir enerji kaynağından sağlandığı ve yörenin güneş enerjisi bakımından bu tür sistemlere uygun olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte sisteme entegre edilecek ısı pompası yardımı ile hem PV panellerin verimlerinin arttırılabileceği hem de evin ihtiyaç duyduğu sıcak suyun büyük bir kısmının bu yolla sağlanabileceği hesaplanmıştır. Ayrıca Iğdır yöresinde bulunabilen andezitik tüflerden oluşan doğal taşların; yapılan laboratuvar ölçümleri neticesinde ısı iletkenlik katsayılarının oldukça düşük yani ısı yalıtım özelliği yüksek ve işlenebilme özelliği kolay, estetik bir yapı malzemesi olduğu görülmüştür. Dolayısı ile elde edilen bu veri ve edimlerin ileride yapılacak uygulamalar ile ampirik çalışmalara fikir vereceği, bunların hazırlık aşamalarında zaman kazandıracağı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında enerjisini PV sistemden elde eden ve yöreden çıkarılan doğal taşlarla estetik bir görsel sunan evin yöre ve civarında bu gibi yapıların inşasında teşvik edici rol oynayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma süresince yapılan araştırmalar neticesinde aşağıda belirtilen öneriler sunulabilir.

✓ Bir PV sistem kurulmadan önce; gerekli fizibilite çalışması yapıldıktan sonra ihtiyaç ve maliyet analizinin birlikte yapılarak optimum sistem ve ekipmanlarının belirlenmesi daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

✓ Akü maliyet ve bakımlarının yüksek olması nedeniyle zorunlu kalmadıkça şebekeden bağımsız (off grid) sistemler yerine, şebeke bağlantılı (on grid) sistemlerin tercih edilmesi daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

✓ Bu çalışma ile teorik hesabı yapılan ısı pompasının uygulaması gerçekleştirilerek, deneysel olarak PV panellerin verimi ve elde edilen su sıcaklığı teorik verilerle kıyaslanabilir.

✓ Sistemin ısı pompası vasıtası ile PV/T sisteme tamamen dönüştürülmesi ile sıcak su haricinde, evin yerden ısıtma sistemine katkısı araştırılabilir. Böylece söz konusu evin yılın belli dönemlerinde ısıtılmasında kullanılacak fosil yakıt miktarı azaltılarak hem maliyet bazında tasarruf sağlanmış olunacaktır hem de doğaya olan CO₂ salınımı azaltılmış olunacaktır.

✓ Iğdır yöresinde yer altından çıkarılan bu doğal taşların laboratuvar ortamında mekanik testleri de yaptırılarak; yapı bileşenleri bakımından diğer özellikleri de araştırılabilir (örneğin basınç dayanımı vb.).

KAYNAKLAR

- Alkan, R.**, 2014.Farklı soğutucu akışkanlar için toprak kaynaklı ısı pompasının termoeconomik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 91s.
- Akay, H.**, 2022. PV panellerde hücre malzemesi ve çevre koşullarının değişimine bağlı olarak panel sıcaklığı ile elektrik üretiminin teorik model ve yapay sinir ağlarıyla incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 51s.
- Aktaş, M., Kara, M. Ç.**, 2013. Güneş enerjisi ve ısı pompalı kurutucuda dilimlenmiş kivi kurutulması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4).733-741.
- Aras, M.**, 2019. Polikristal ve monokristal tip ftovoltaik güneş panellerinin Erzurum kış ayları koşullarında karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum 2019.
- Aydar, E., Üresin, E., Livatyalı, H.**, 2010. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden elektrik üretimi. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, *Enerji Enstitüsü TTDM*. 68:35-40.
- Bayar, U.**, 2016. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanan bir yeşil ev analizinin uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2016. 105s.
- Bilen, K., Demir, O.**, 2021. Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının farklı soğutucu akışkanlar için enerji ve ekserji analizi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2):688-705.
- Chan, C.W., Siqueiros, E., Ling-Chin, J., Royapoor, M., Roskilly, A.P.**, 2015. Heat utilisation technologies: A critical review of heatpipes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50: 615-627, 2015.
- Chow, T.T.**, 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, 87, 365-379, 2010.
- Çengel, Y., Boles, M.**, 2012. Termodinamik, Mühendislik yaklaşımıyla. Güven Bilimsel İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 946s.
- Çengel, Y., Boles, M.**, 2015. Termodinamik, Mühendislik yaklaşımıyla. Palme Yayıncılık, Ankara, 978s.
- Çomaklı, Ö., Kaygusuz, K., Ayhan, T.**, 1993. Solar-assisted heat pump and energy storage for residential heating. *Solar energy*, 51(5), 357-366.
- Dubey, S., Tiwari, G.N.**, 2008. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, *Solar Energy*, 82, 602-612, 2008.

- Durmaz, Ş.,** 2012. Isı pompası sistemleri. *Türk tesisat mühendisleri derneği TTMD*.78:28-36.
- Erdemir, D., Altuntop, N.,** 2018.Güneş enerjisinde sıcak su elde etme yöntemleri ve bu yöntemin Türkiye'deki gelişimi. *Mühendis ve Makina*. 29 (707): 35-42. 2018.
- Ezcan, H., O.,** 2019. Fotovoltaik termal (Pv/T) enerji sistemlerinin analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze 2019.
- Fine, J.P., Friedman, J., Dworkin, S.B.,** 2017. Detailed modeling of a novel photovoltaic thermal cascade heat pump domestic water heating system. *Renewable Energy*, 101, 500-513.
- Gang, P., Huide, F., Jie, J., Tin-tai, C., Tao, Z.,** 2012. Annual analysis of heat pipe PV/T systems for domestic hot water and electricity production, *Energy Conversion and Management*, 56, 8-21s.
- Gemicioğlu, A.G.,** 2011. Türkiye'de enerji verimliliği açısından PV sistemlerin performansının değerlendirilmesinde kullanılabilecek bir yaklaşım. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2011.
- Gündüz, A.B.,** 2007. Bilecik ilinde güneş enerjisi destekli ısı pompasıyla sıcak su üretiminin performansı. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 106s.
- Hariri, N.** 2022. A novel dust mitigation technology solution of a self-cleaning method for a PV module capable of harnessing reject heat using shape memory alloy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101894.
- Hawladar, M. N. A., Chou, S. K., Ullah, M. Z.,** 2001. The performance of a solar assisted heat pump water heating system. *Applied Thermal Engineering*, 21(10), 1049-1065.
- İnanç, Ö.,** 2020. Fotovoltaik (PV) panelde ısı taşınımının analizi. *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük 2020.
- Ji, J., He, H., Chow, T., Pei, G., He, W., Liu, K.,** 2009. Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5-6), 1365-1373.
- Kabul, A., Duran, F.,** 2014. Isparta ilinde fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit sistemin performans analizi, *SDU International Technologic Science*, 6 (1), 31-43s.
- Kahraman, D.,** 2010. Güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretiminin teknik-ekonomik analizi ve yöresel uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 123s.

- Kantaroğlu, F.,** 2010. Fotovoltaik sistemler. *Türk tesisat mühendisleri derneği TTMD*.45:28- 34.
- Katkar, A.A., Shinde, N.N., Patil, P.S.** 2011. Performance & evaluation of industrial solar cell w.r.t. temperature and humidity, *IJRMET*, 1, 69–73.
- Kaygusuz, K.** 2000. Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump. *Renewable energy*, 21(1), 79-102.
- Kepekçi, H., İ.,** 2014. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi bileşenlerinin analizi ve tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 93s.
- Kızılkın, Ö.,** 2017. Arkadan su soğutma ile fotovoltaik panellerin verimliliğinin artırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Siirt Üniversitesi, Siirt, 2017. 68s.
- Koçak, S.,** 2012. Hacim ısıtma amaçlı güneş enerjisi destekli su kaynaklı ısı pompası çevriminin teorik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 150s.
- Li, H., Yang, H.,** 2009. Potential application of solar thermal systems for hot water production in Hong Kong. *Applied Energy*, 86:175-180.
- Livatyah, H., Yıldırım, T.,** 2012. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisindeki gelişmeler. *Mühendis ve Makina*, 53(633).16-20.
- Moradgholi, M., Nowee, S.M., Abrishamchi, I.,** 2014. Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system, *Solar Energy*, 107,82-88, 2014.
- Obeng, M., Gyamfi, S., Derkyi N.S., Kabo-bah, A.T., Peprah, F.,** 2020. Technical and economic feasibility of a 50 mw grid-connected solar pv at uenr nsoatre campus, *Journal of Cleaner Production*, vol. 247, p. 119 159, 2020.
- Ocak, M.E.,** 2022. Güneş enerjisinin kaynağı nedir?
<https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunes-enerjisinin-kaynagi-nedir> , 2 Eylül 2022.
- Özcan, Ö.,** 2020. Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin performans analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2020.
- Özyaman, A.C.,** 2011. Güneş enerjisi destekli ısı pompası ile mahal ısıtma uygulaması. *Tesisat Mühendisliği*, 123, 68-75.
- Pathak, M.J.M., Sanders, P.G., Pearce, J.M.,** 2014. Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems, *Applied Energy*, 120, 115-124.

- Saraçoğlu, O.G.,** 2022. Güneş kaç yaşındadır? Güneş hakkında önemli bilgiler. <https://www.bilgiustam.com/gunes-kac-yasindadir-gunes-sistemi-hakkinda-onemli-bilgiler/>, 2 Eylül 2022.
- Seçilmiş, A.,** 2006. Su kaynaklı ısı pompalarında ekserji analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2006. 113s.
- Sefer, G.,** 2023. PV/T sistem performansına zorlanmış hava/nanoakışkan çiftlerinin etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, 121s.
- Şensoy, B.,** 2019. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemlerinin performans analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2019. 128s.
- URL-1,** 2023. <https://www.genbayapimarket.com/cw-enerji-320-watt-72-polikristal-gunes-paneli>. Polikristal güneş paneli. 3 Ağustos 2023.
- URL-2,** 2023. <https://tr.ds solar.com/solar-panel/cigs-solar-module-panel/140w-flexible-cigs-solar-module.html>. İnce film paneller. 3 Ağustos 2023.
- URL-3,** 2023. <https://www.enerjibes.com/gunes-enerjisi-kurulumu/> . Çok basit şekilde güneş enerjisi kurulumu. 25 Temmuz 2023.
- Utlü, Z.,** 1999. İzmir koşullarında güneş enerjisi destekli ısı pompası tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, 266s.
- Uyar, S., Najafi, A.,** 2020. Çatı üstü termal ve elektrik enerjisi üretiminin ekonomik ve çevresel getirilerinin araştırılarak optimal PV-T tasarımı. *EMO Bilimsel Dergi*. YEKSEM 2019 Özel Sayısı.
- Üçgül, İ., Arslan, Ö., Elibüyük, U., Emen., Y.,** 2019. Parabolik oluk yoğunlaştırıcı sistemlerin Isparta organize sanayi bölgesinde kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM e-DERGİ*, 2(4):40-48, 2019.
- Yılmaz, V.,** 2000. Toprak kaynaklı ısı pompasının klasik sistemlerle tekno-ekonomik karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000. 86s.
- Zhang, X., Zhao, X., Xu, J., Yu, X.,** 2013. Charactrization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system, *Applied Energy*, 102, 1229-1245. 2013.
- Zhang, X., Zhao, X., Shen, J., Xu, J. Yu, X.,** 2014. Dynamic performance of a novel solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump system, *Applied Energy*, 114, 335-352. 2014.
- Zhao, X., Zhang, X., Riffat, S.B., Su, Y.,** 2011. Theoretical study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation, *Energy Conversion and Management*, 52, 603-614s.

- Wang, G., Zhaoa, Y., Quan, Z., Tong, J.,** 2018. Application of a multi-function solar-heat pump system in residential buildings, *Applied Thermal Engineering*, 130, 922-937.
- Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y., Tong, J.,** 2015. Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system, *Energy and Buildings*, 108, 175-184. 2015.
- Wu, S.Y., Zhanga, Q.L., Xiaoa L., Guo, F.H.,** 2011. A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation, *Energy and Buildings*, 43, 3558-3667, 2011.
- Xu, G. Deng, S., Zhang, X., Yang, L., Zhang, Y.,** 2009. Simulation of a photovoltaic/thermal heat pump system having a modified collector/evaporator, *Solar Energy*, 83, 1967-1967.

EKLER

 SERAMİK ARAŞTIRMA MERKEZİ	SERAMİK ARAŞTIRMA MERKEZİ A.Ş. ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ Mersis No:0761048749700014 Vergi D.:Eskişehir VD. Bşk. Vergi No:7610487497 Tel: 0 (222) 323 82 76 - 335 09 59 Faks: 0 (222) 322 29 43 Web: www.seramikarastirma.com.tr e-posta : mail@seramikarastirma.com.tr	TEST/ANALİZ RAPORU Testing analysis report	Rapor No: R 1723 Report Number
Müşterinin adı/adresi Customer name and adress	: AYDIN ATALAR SÖĞÜTLÜ MAH. HAL SK. NO:7/11 TC:60661139372 - MERKEZ İGDIR		
İstek numarası Order no.	: SAM21-6477, SAM21-6478, SAM21-6479, SAM21-6480, SAM21-6481, SAM21-6482		
Numunenin adı ve tarifi Name of identity of test item	: A-1, A-2, A-3, Y-1, Y-2, Y-3		
Numunenin kabul tarihi The date of receipt of test item	: 04.11.2021		
Açıklamalar Remarks	: Numune alma işlemi firma yetkilileri tarafından yapılmıştır. (Sampling operation is performed by the company.)		
Testin yapıldığı tarih Date of test	: 04.11.2021		
Raporun sayfa sayısı Number of pages of the Report	: 4		
Deney ve/veya ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri (olması halinde) ve test metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. The testing and/or measurement results, the uncertainties (if applicable) with confidence probability and test methods are given on the following pages which are part of this report. Test sonuçları sadece testleri yapılan numunelere aittir. Testi yapılan numuneler saklanmamaktadır. Test results only belong to samples analysed. Analysed samples are not be kept.			
Mühür Seal	Tarih Date	Test/Analiz Sorumlusu Person in charge of test	Onay R&D Manager / Test & Analysis Manager
	04.11.2021	MUSTAFA ÇOBANCI Mustafa ÇOBANCI	ERHAN AYAS Doç.Dr. Erhan AYAS

Bu rapor, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz raporlar geçersizdir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.

KYF 510-1Rev00/17052011



SERAMİK ARAŞTIRMA MERKEZİ A.Ş.

Anadolu Üniversitesi Yunusemre Kampüsü
ETGB Anadolu Teknoparkı No:107-103 ESKİŞEHİR

Mersis No: 0761048749700014 Vergi D.: Eskişehir VD Bşk. Vergi No: 7610487497
Tel: 0 (222) 323 82 76 - 335 09 59 Faks: 0 (222) 322 29 43
Web: www.seramikarastirma.com.tr e-posta: mail@seramikarastirma.com.tr

Ürün özelliklerine göre minimum numune çapı 25 mm olacak şekilde numune hazırlanır. Kalınlık ise minimum köpük için 2 mm, polimer 5 mm, seramik 5 mm ve metal için 5-12 mm arasında olacak şekilde numune uygun boyutlara getirilir. Isıl iletkenlik ölçüm aralığı ise 0-10 W/(m*K) olduğu için bu aralıkta ölçüm gerçekleştirilir. Isıl iletkenlik, bir malzeme boyunca ısı akışının ölçüsüdür. İyi bir ısıl iletkenlik için numunenin homojen olması çok önemlidir.

Göndermiş olduğunuz numunelere ait oda sıcaklığında ısıl iletkenlik analizi ölçüm sonuçları tablo (1) ve ekte (2) verilmiştir.

Tablo1. İletkenlik değerleri.

Numune	k (W/mK)
A1	0,300
A2	0,281
A3	0,326
Y1	0,532
Y2	0,631
Y3	0,568

Not: Ölçümler C-Therm Technologies marka TH89-05-00400 model iletkenlik cihazı ile yapılmıştır.

A1												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	665,473	0,296	26,616	0,999	03.11.2021 10:25	4912,2	4937,0	24,8	23,3	1,5
2	H525	True	670,191	0,301	26,694	0,999	03.11.2021 10:27	4911,9	4936,7	24,8	23,3	1,5
3	H525	True	670,381	0,301	26,697	1,000	03.11.2021 10:28	4911,9	4936,6	24,7	23,3	1,5
4	H525	True	671,408	0,302	26,713	0,999	03.11.2021 10:29	4911,5	4936,3	24,8	23,2	1,5
5	H525	True	668,769	0,300	26,667	0,999	03.11.2021 10:30	4911,7	4936,5	24,7	23,2	1,5
A2												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	645,910	0,278	26,295	0,999	03.11.2021 10:35	4914,6	4939,7	25,1	23,5	1,5
2	H525	True	649,881	0,282	26,359	0,999	03.11.2021 10:36	4914,4	4939,5	25,1	23,5	1,5
3	H525	True	648,022	0,280	26,328	0,999	03.11.2021 10:37	4913,6	4938,7	25,1	23,5	1,5
4	H525	True	650,612	0,282	26,370	0,999	03.11.2021 10:38	4913,4	4938,5	25,1	23,4	1,5
5	H525	True	649,783	0,281	26,356	0,999	03.11.2021 10:39	4913,3	4938,3	25,1	23,4	1,5
A3												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	692,839	0,323	27,095	1,000	03.11.2021 10:42	4915,3	4939,8	24,5	23,6	1,5
2	H525	True	694,853	0,325	27,128	1,000	03.11.2021 10:43	4915,2	4939,6	24,4	23,6	1,5
3	H525	True	696,450	0,326	27,155	1,000	03.11.2021 10:45	4915,4	4939,8	24,4	23,6	1,5
4	H525	True	698,036	0,328	27,180	0,999	03.11.2021 10:46	4914,9	4939,3	24,4	23,5	1,5
5	H525	True	696,685	0,326	27,157	0,999	03.11.2021 10:47	4914,7	4939,1	24,4	23,5	1,5
Y1												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	898,913	0,527	30,593	1,000	03.11.2021 11:16	4916,2	4938,8	22,6	23,7	1,4
2	H525	True	903,151	0,531	30,662	1,000	03.11.2021 11:18	4915,8	4938,4	22,6	23,6	1,4
3	H525	True	907,300	0,535	30,729	1,000	03.11.2021 11:19	4915,3	4937,9	22,6	23,5	1,3
4	H525	True	903,212	0,531	30,657	1,000	03.11.2021 11:20	4914,6	4937,2	22,6	23,5	1,3
5	H525	True	906,061	0,534	30,704	1,000	03.11.2021 11:21	4914,2	4936,8	22,5	23,5	1,3
Y2												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	996,570	0,628	32,244	1,000	03.11.2021 11:08	4915,4	4936,7	21,3	23,6	1,3
2	H525	True	999,090	0,630	32,288	1,000	03.11.2021 11:09	4915,5	4936,9	21,3	23,6	1,3
3	H525	True	998,855	0,630	32,282	1,000	03.11.2021 11:11	4915,0	4936,3	21,3	23,6	1,3
4	H525	True	1000,294	0,632	32,302	1,000	03.11.2021 11:12	4914,1	4935,4	21,3	23,5	1,3
5	H525	True	1002,728	0,634	32,343	1,000	03.11.2021 11:14	4914,1	4935,4	21,3	23,5	1,3
Y3												
#	Sensor	Valid	Effusivity (Ws/kg/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Start	V0 (mV)	VMax (mV)	Delta V (mV)	Ambient (°C)	Delta T (°C)
1	H525	True	938,042	0,567	31,254	1,000	03.11.2021 10:50	4915,3	4937,5	22,2	23,6	1,3
2	H525	True	936,946	0,566	31,236	1,000	03.11.2021 10:51	4915,9	4938,1	22,2	23,6	1,3
3	H525	True	939,383	0,568	31,277	1,000	03.11.2021 10:52	4915,8	4937,9	22,2	23,6	1,3
4	H525	True	941,726	0,571	31,314	1,000	03.11.2021 10:54	4915,5	4937,6	22,1	23,6	1,3
5	H525	True	939,186	0,568	31,268	1,000	03.11.2021 10:55	4914,7	4936,8	22,1	23,5	1,3

ACIKLAMA

Effusivity ($W s^{1/2}/m^2K$)	Effusivity metodun kalibrasyonu ile cihaz tarafından ölçulmuş değeri
k (W/mK)	Termal iletkenlik metodun kalibrasyonu ile cihaz tarafından ölçulmuş değeri
Start	Herbir ölçüm için başlangıç zamanı
R2	R2 değeri Vt egrisinin herbir ölçüm için ne kadar düz olduğunu gösterir.
V0 (mV)	Herbir ölçüm için başlangıç voltajı
VMax (mV)	Herbir ölçüm için maksimum voltaj
DeltaV (mV)	Herbir ölçüm için başlangıç ve bitiş voltajı arasındaki fark.
Ambient (°C)	Herbir ölçüm için ortam sıcaklığı
T0 (°C)	Herbir ölçüm için başlangıç sıcaklığı
DeltaT (°C)	Ölçüm sırasında sensör yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi

Binanın Özgöl Isı Kaybı Hesabı

Proje Adı : DOĞAL TAŞ EV

Sayfa : 1

BİNADAKİ YAPI ELEMANLARI		Yapı Elemanının Kalınlığı	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Isıl İletkenlik Direnci	Isıl Geçirgenlik Katsayısı	Isı Kaybedilen Yüzey	Isı Kaybı
		d	λ_k	R	U	A	A x U
		(m)	(W/mK)	(m²K/W)	W/m²K	m²	W/K
DH-1-Duvar(Dış Hava Temaslı)							
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,235	0,439	0,54			
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,03	0,030	1			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,235	0,439	0,54			
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (dış)			0,04			
TOPLAM				2,25	0,446	108,45	48,37
DH-2-Duvar(Dış Hava Temaslı)							
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,125	0,439	0,28			
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,03	0,030	1			
7.5.1.1.1	Hafif betondan TS EN 771-3 e uygun BDB türü 1 sıra boşluklu genişlik 115mm; 1 sıra 150mm; 2 sıra ≤ 240 mm; 3 sıra ≤ 300 , 4 sıra ≤ 365 , 5 sıra ≤ 425 , 6 sıra ≤ 490 olan bloklarda	0,25	0,28	0,89			
4.2	Çimento harcı	0,02	1,8	0,01			
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	0,51	0,02			

Binanın Özgöl Isı Kaybı Hesabı

Proje Adı : DOĞAL TAŞ EV

Sayfa : 2

BİNADAKİ YAPI ELEMANLARI		Yapı Elemanının Kalınlığı	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Isıl İletkenlik Direnci	Isıl Geçirgenlik Katsayısı	Isı Kaybedilen Yüzey	Isı Kaybı
		d	λ	R	U	A	A x U
		(m)	(W/mK)	(m²K/W)	W/m²K	m²	W/K
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (dış)			0,04			
TOPLAM				2,37	0,42	138,54	58,19
DH-3-Duvar(Dış Hava Teması)							
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,125	0,439	0,28			
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	2,5	0,1			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,125	0,439	0,28			
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (dış)			0,04			
TOPLAM				0,83	1,191	25,92	30,87
DH-4-Duvar(Dış Hava Teması)							
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1800	0,125	0,439	0,28			
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	2,5	0,1			
4.2	Çimento harcı	0,02	1,6	0,01			
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	0,51	0,02			
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (dış)			0,04			
TOPLAM				0,58	1,704	23,85	40,64
CC-1-Tavan(Üzeri Çatılı)							
1/2a	Yüzeyssel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	0,51	0,02			

Binanın Özgöl Isı Kaybı Hesabı

Proje Adı : DOĞAL TAŞ EV

Sayfa : 3

BİNADAKİ YAPI ELEMANLARI		Yapı Elemanının Kalınlığı	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Isıl İletkenlik Direnci	Isıl Geçirgenlik Katsayısı	Isı Kaybedilen Yüzey	Isı Kaybı
		d	λ_k	R	U	A	A x U
		(m)	(W/mK)	(m²K/W)	W/m²K	m²	W/K
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	2,5	0,1			
10.6.1.1	Cam köpüğü TS 901 EN 13167 e uygun; yoğunluk 100-150; ısı iletkenlik grubu 045	0,15	0,045	3,33			
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (dış)			0,08			
TOPLAM				3,66	0,8x0,273	133,51	29,16
CA-1-Tavan(Üzeri Açık)							
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (iç)			0,13			
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	0,51	0,02			
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	2,5	0,1			
9.2.2.5	Polimer bitümlü su yalıtım örtüleri	0,02	0,19	0,11			
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,1	0,030	3,33			
4.6	Çimento harçlı şap	0,1	1,4	0,07			
1.6	Mermer	0,025	3,5	0,01			
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (dış)			0,04			
TOPLAM				3,81	0,263	40	10,52
TT-1-Taban(Toprak Temaslı)							
1/2a	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (iç)			0,17			
8.1.1	İğne yapraklı ağaçlardan elde edilmiş olanlar	0,001	0,13	0,01			
4.6	Çimento harçlı şap	0,1	1,4	0,07			

Binanın Özgöl Isı Kaybı Hesabı

Proje Adı : DOĞAL TAŞ EV

Sayfa : 4

BINADAKİ YAPI ELEMANLARI		Yapı Elemanının Kalınlığı	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Isıl İletkenlik Direnci	Isıl Geçirgenlik Katsayısı	Isı Kaybedilen Yüzey	Isı Kaybı
		d	λ	R	U	A	A x U
		(m)	(W/mK)	(m ² K/W)	W/m ² K	m ²	W/K
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,8	2,5	0,32			
10.3.2.2.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 30 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,04	0,030	1,33			
9.2.2.5	Polimer bitümlü su yalıtım örtüleri	0,02	0,19	0,11			
4.6	Çimento harçlı şap	0,05	1,4	0,04			
3.5.1	Gözenekli doğal taş mıcırları; yoğunluk ≤ 1200	0,1	0,22	0,45			
1/26	Yüzeysel ısı iletim katsayısı (dış)			0			
TOPLAM				2,5	0,5x0,4	188	37,6
PENCERE 1					2,1	72,74	152,754
KAPI 1					4,0	6,2	24,8

İletim Yolu ile Gerçekleşen Isı Kaybı, H_i = 432,9 W/K

Havalandırma Yolu ile Gerçekleşen Isı Kaybı, H_v = 227,46 W/K

Binanın Toplam Isı Kaybı, $H = H_i + H_v$ = 660,36 W/K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Duvar(Dış Hava Temaslı) DH - 1**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
		d	μ	S_d	S_{dT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,235	15	3,525	3,525	0,439	0,535	0,78
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,03	150	4,5	8,025	0,030	1	1,78
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,235	15	3,525	11,55	0,439	0,535	2,32
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	2,36

U Değeri= 0.42 W/m²K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Duvar(Dış Hava Temaslı) DH - 2**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
		d	μ	S_d	S_{dT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,125	15	1,875	1,875	0,439	0,285	0,53
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,03	150	4,5	6,375	0,030	1	1,54
7.5.1.1.1	Hafif betondan TS EN 771-3 e uygun BDB türü 1 sıra boşluklu genişlik 115mm; 1 sıra 150mm; 2 sıra ≤ 240 mm; 3 sıra ≤ 300 , 4 sıra ≤ 365 , 5 sıra ≤ 425 , 6 sıra ≤ 490 olan bloklarda	0,25	8	2	8,375	0,28	0,893	2,43
4.2	Çimento harcı	0,02	15	0,3	8,675	1,6	0,012	2,44
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	10	0,1	8,775	0,51	0,02	2,46
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	2,5

U Değeri= 0.4 W/m²K

Yapı Elemanının Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Duvar(Dış Hava Temaslı) DH - 3**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
-	-	d	μ	S_s	S_{sT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,125	15	1,875	1,875	0,439	0,285	0,53
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	100	25	26,875	2,5	0,1	0,63
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,125	15	1,875	28,75	0,439	0,285	0,92
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	0,96

U Değeri= 1.04 W/m²K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Duvar(Dış Hava Temaslı) DH - 4**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
-	-	d	μ	S_s	S_{sT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
1.3	Gözenekli püskürük taşlar; yoğunluk ≤ 1600	0,125	15	1,875	1,875	0,439	0,285	0,53
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agregaya veya micir kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	100	25	26,875	2,5	0,1	0,63
4.2	Çimento harcı	0,02	15	0,3	27,175	1,6	0,012	0,65
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	10	0,1	27,275	0,51	0,02	0,67
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	0,71

U Değeri= 1.41 W/m²K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Tavan(Üzeri Çatılı) CC - 1**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabaka Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabaka Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
-	-	d	μ	S_d	S_{dT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	10	0,1	0,1	0,51	0,02	0,27
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	100	25	25,1	2,5	0,1	0,37
10.B.1.1	Cam köpüğü TS 901 EN 13167 e uygun; yoğunluk 100-150; ısııl iletkenlik grubu 045	0,15	20000	3000	3025,1	0,045	3,333	3,7
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	3,74

U Değeri= 0.27 W/m²K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Tavan(Üzeri Açık) CA - 1**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyisel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
-	-	d	μ	S_d	S_{dT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
4.4	Yalnız alçı kullanarak (agregasız) yapılmış sıva	0,01	10	0,1	0,1	0,51	0,02	0,27
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya micir kullanılarak yapılmış betonlar	0,25	100	25	25,1	2,5	0,1	0,37
9.2.2.5	Polimer bitümlü su yalıtım örtüleri	0,02	20000	400	425,1	0,19	0,105	0,48
10.3.2.1.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 25 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,1	150	15	440,1	0,030	3,333	3,81
4.6	Çimento harçlı şap	0,1	15	1,5	441,6	1,4	0,071	3,88
1.6	Mermer	0,025	10000	250	691,6	3,5	0,007	3,89
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,04	3,93

U Değeri= 0.25 W/m²K

Yapı Elemanın Termofiziksel Özellikleri Çizelgesi**Taban(Toprak Temaslı) TT - 1**

Sütun	1	2	3	4	5	6	7	8
No.	Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Su Buharı Difüzyon Direnci Katsayısı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı	Difüzyon Dengi Hava Tabakası Kalınlığı (kümülatif)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci	Yüzeyel Isıl İletim Direnci, Malzemenin Isıl Direnci (kümülatif)
		d	μ	S_s	S_{sT}	λ_n	R	R _t
-	-	m	-	m	m	W/(m.K)	m ² .K/W	m ² .K/W
-	İçeri Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0,25	0,25
8.1.1	İğne yapraklı ağaçlardan elde edilmiş olanlar	0,001	40	0,04	0,04	0,13	0,008	0,26
4.6	Çimento harçlı şap	0,1	15	1,5	1,54	1,4	0,071	0,33
5.1.1	Donatılı - Normal beton (TS 500e uygun) doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar	0,8	100	80	81,54	2,5	0,32	0,65
10.3.2.2.1	Ekstrüde polistiren köpüğü - TS 11989 EN 13164 e uygun; yoğunluk ≥ 30 ; ısı iletkenlik grubu 030	0,04	150	6	87,54	0,030	1,333	1,98
9.2.2.5	Polimer bitümlü su yalıtım örtüleri	0,02	20000	400	487,54	0,19	0,105	2,09
4.6	Çimento harçlı şap	0,05	15	0,75	488,29	1,4	0,036	2,12
3.5.1	Gözenekli doğal taş mıcırları; yoğunluk ≤ 1200	0,1	3	0,3	488,59	0,22	0,455	2,58
-	Dışarı Isı Geçişi	-	-	-	-	-	0	2,58

U Değeri= 0.39 W/m²K