



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK TERMAL (PVT) PANEL VE
HAVA KAYNAKLI ISI POMPASI
BÜTÜNLEŞİK SİSTEMİNİN
TERMODİNAMİK ANALİZİ

ASLI ARPINAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Aslı ARPINAR tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Termal (PVT) Panel ve Hava Kaynaklı Isı Pompası Bütünleşik Sisteminin Termodinamik Analizi” adlı tez çalışması 22/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

ASLI ARPINAR

Tarih:22.12.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK TERMAL (PVT) PANEL VE HAVA KAYNAKLI ISI POMPASI BÜTÜNLEŞİK SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Aslı ARPINAR

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY

2024, 124 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ

Isıtma-soğutma ihtiyacını karşılamak ve elektrik üretmek amacıyla kullanılacak bir PVT (fotovoltaik termal) ve ısı pompası bütünleşik sisteminin enerjetik analizi yapılmıştır. Öngörülen sistemde sabit ve/veya değişken devirde çalışabilen hermetik scroll kompresörlü hava kaynaklı R404A soğutucu akışkanlı bir ısı pompasının kullanıldığı düşünülmüş ve sistemin çözüm algoritmaları EES'ye (Engineering Equation Solver) aktarılarak parametrik analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, ısıtım miktarı ve panel alanının artması, çevre sıcaklığının ise azalması durumunda üretilen elektrik gücünün lineer olarak arttığı belirlenmiştir. PVT-Evaporatör entegrasyonu yapılarak panelin soğutucu akışkanla soğutulması durumunda elektriksel veriminin arttığı tespit edilmiştir. Sabit devirde çalışan kompresörlü ve PVT'li bir bütünleşik sistemde ısıtım veya panel alanının artması veya çevre sıcaklığının azalması durumunda kondenser sıcaklığı ve kompresör gücü düşmekte ve COP_{IP} yükselmektedir. Değişken devirde çalışan kompresörlü ve PVT'li bir bütünleşik sistemde ısıtım ve alan artışı ile kompresör devir sayısı artmakta COP_{IP} ise kompresörde tüketilen güç ve kondenser kapasitesindeki artışa bağlı olarak ilk başta hızla artmakta belirli bir değerden sonra ise artış oranı yavaşlamaktadır. Değişken devirli kompresörlü sistemde çevre sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kondenser sıcaklığı $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, PVT'li ısı pompasının ısıtma performans katsayısı, PVT'siz sisteme göre %27,87 daha yüksektir. Sabit veya değişken devirde çalışan kompresörlü ve $1,65\text{ x }9\text{ m}^2$ panel alanlı bütünleşik bir sistemin Antalya iline kurulması durumunda öğle saatlerinde üretilen elektriğin, ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) kompresör tüketim gücünü karşılayacağı belirlenmiştir. Ancak, sabit devirli bütünleşik sistemde kondenser sıcaklığının öğle saatlerinde $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşeceği, değişken devirli sistemde ise devir sayısı ayarlanarak kondenser sıcaklığının $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabileceği ve ısıtmanın daha konforlu yapılabileceği tespit edilmiştir. Antalya ili için ısıtma sezonunda değişken devirli kompresörlü bütünleşik sistemin COP_{IP} 'unun PVT'siz sisteme göre ortalama %34,55 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Antalya ili için soğutma sezonunda (Nisan-Eylül), kondenser sıcaklığı $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, sabit devirli bütünleşik sistemde 09.45-14.45 saatleri arasında, değişken devirli bütünleşik sistemde ise 08.45-16.45 saatleri arasında elektrik üretimi kompresör tüketim gücünü karşılayabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: COP, Elektrik Üretimi, Enerji, Güneş, Isı Pompası, PVT, Termodinamik Analiz

ABSTRACT

MS THESIS

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC THERMAL (PVT) PANEL AND AIR SOURCE HEAT PUMP INTEGRATED SYSTEM

Aslı ARPINAR

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY

2024, 124 Pages

Jury

Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Asst. Prof. Dr. Nagihan BİLİR SAĞ

An energetic analysis of a PVT (photovoltaic thermal) and heat pump integrated system that can be used to meet the heating-cooling needs and to generate electricity has been carried out. In the envisaged system, an air source R404A refrigerant heat pump with a hermetic scroll compressor that can operate at constant and/or variable speed is considered to be used and the solution algorithms of the system are transferred to EES (Engineering Equation Solver) and parametric analyzes are performed.

According to the results obtained, it was determined that the electrical power generated increases linearly when the irradiation amount and panel area increase and the ambient temperature decreases. It is determined that the electrical efficiency increases when the panel is cooled with refrigerant by integrating PVT-Evaporator. In an integrated system with a constant speed compressor and PVT, the condenser temperature and compressor power decrease and COP_{IP} increases when the irradiation or panel area increases or the ambient temperature decreases.. In an integrated system with a variable speed compressor and PVT, the compressor speed increases with the increase in radiation and area, and the COP_{IP} increases rapidly at first due to the increase in the power consumed in the compressor and the condenser capacity, and the rate of increase slows down after a certain value. In the system with variable speed compressor, when the ambient temperature is $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the condenser temperature is $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, the heating performance coefficient of the heat pump with PVT is 27.87% higher than the system without PVT. It is determined that if an integrated system with a fixed or variable speed compressor and a panel area of $1.65 \times 9\text{ m}^2$ is installed in Antalya province, the electricity generated at noon will meet the compressor consumption power during the heating season (October-March). However, it was determined that in the integrated system with constant speed, the condenser temperature will drop to $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ at noon, while in the variable speed system, the condenser temperature can be kept constant at $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ by adjusting the number of revolutions and heating can be done more comfortably. In the heating season for Antalya province, the COP_{IP} of the integrated system with variable speed compressor is 34.55% higher than the system without PVT. In the cooling season (April-September) for Antalya province, when the condenser temperature is $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, it is determined that the electricity generation can meet the compressor consumption power between 09.45-14.45 hours in the fixed speed integrated system and between 08.45-16.45 hours in the variable speed integrated system.

Keywords: COP, Electricity Generation, Energy, Sun, Heat Pump, PVT, Thermodynamic Analysis

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda ve akademik hayatımda bana yol gösterici olan, bilgi, birikim ve tecrübelerini her daim benimle paylaşan, her zaman öğrencisi olmaktan gurur duyduğum tez danışman hocam Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY'a, bana vakit ayırarak görüş ve önerileriyle tezime katkılarda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Nagihan BİLİR SAĞ'a, zaman zaman yardımını aldığım Dr. Arş. Gör. Oğuz ÇALIŞKAN'a, anabilim dalı üyelerimize ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, bana inanan, güvenen, maddi-manevi her türlü desteklerini sunan, beni motive eden eşim Müfit Samet ARPINAR'a ve tüm hayatım boyunca beni cesaretlendiren, moral veren annem Aliye YİĞİTER'e ve son olarak her daim yakınımnda hissettiğim sevgili aileme gönülden teşekkürler.

Aslı ARPINAR
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Isı Pompaları	5
1.1.1. Isı pompalarının tarihçesi.....	8
1.1.2. Kaynak çeşitlerine göre ısı pompaları	9
1.2. Fotovoltaik Termal Sistemler	14
1.2.1. Güneş enerjisi	15
1.2.2. Fotovoltaik paneller	16
1.2.2.1. Kristal silikon güneş panelleri	17
1.2.3. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri	22
1.3. Soğutucu Akışkanlar	25
1.3.1. Soğutucu akışkanların sınıflandırılması.....	27
1.3.2. Soğutucu akışkan karışımları.....	27
1.3.3. R404A.....	28
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
3.1. Fotovoltaik Termal (PVT) Güneş Paneli	44
3.2. PVT-Isı Pompası Bütünleşik Sistemi	51
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
4.1. PVT Modelinin Doğrulanması ve Kompresör Modeli	62
4.2. PVT'nin Termodinamik Analiz Sonuçları.....	64
4.2. Sabit Devirde Çalışan Kompresörlü PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Termodinamik Analiz Sonuçları	67
4.2.1. Kolektör alanının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi	67
4.2.2. Işınım miktarının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi.....	70
4.2.3. Çevre sıcaklığının PVT'li bütünleşik ve PVT'siz sistemin performans parametrelerine etkisi.....	74
4.3. Değişken Devirde Çalışan Kompresörlü PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Termodinamik Analiz Sonuçları.....	77
4.3.1. Kolektör alanının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi	77
4.3.2. Işınım miktarının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi.....	80
4.3.3. Çevre sıcaklığının PVT'li ve PVT'siz sistemin performans parametrelerine etkisi.....	83

4.3.4. Değişken devirde çalışan kompresörlü PVT'li bütünleşik sistemde kondenser sıcaklığının <i>COP</i> üzerindeki etkisi	87
4.4. Antalya İli İçin PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Aylık <i>COP</i> Değişimleri.....	89
4.4.1. Antalya İli İçin PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Isıtma Sezonu Aylık <i>COP</i> Değişimleri.....	90
4.4.2. Antalya İli İçin PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Soğutma Sezonu Aylık <i>COP</i> Değişimleri	98
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
5.1. Sonuçlar	105
5.2. Öneriler	108
KAYNAKLAR	109
EKLER	116
EK-1 Kompresör tüketim gücü, debi ve kompresör çıkış sıcaklığını bulmak için kullanılan katsayılar ve polinom.....	116
EK-2 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde kış sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları	117
EK-3 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem ile PVT'siz ısı pompası performans değerleri	118
EK-4 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde yaz sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları	119
EK-5 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem performans değerleri	120
EK-6 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde kış sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları	121
EK-7 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem ile PVT'siz ısı pompası performans değerleri	122
EK-8 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde yaz sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları	123
EK-9 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem performans değerleri	124

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$h_{conv,t}$	: Üst konveksiyon ısı transfer katsayısı [W/(m ² K)]
h_i	: Akışkanın ısı taşınım katsayısı [W/(m ² K)]
h_l	: Sıvı entalpisi [kJ/kg]
h_{p1}	: Isı transfer katsayısı oranı
h_{rad}	: Işınım ile gerçekleşen ısı transfer katsayısı [W/(m ² K)]
h_v	: Buhar entalpisi [kJ/kg]
K_{cam}	: Cam kapağın ısı iletim katsayısı [W/ (m.K)]
$K_{hücre}$	: Silikon solar hücre ısı iletim katsayısı [W/ (m.K)]
K_{tedlar}	: Tedlar ısı iletim katsayısı [W/ (m.K)]
k	: Ross katsayısı
L_{cam}	: PVT üzerindeki cam kapağın kalınlığı [m]
$L_{hücre}$	: Silikon solar hücre kalınlığı [m]
L_{tedlar}	: Tedlar kalınlığı [m]
$\dot{m}$	: Kütleli debi [kg/s]
Q_{abs}	: PVT paneli tarafından asimile edilen termal enerji
Q_{evap}	: Evaporatör soğutma kapasitesi [kW]
Q_{kon}	: Kondenser ısıtma kapasitesi [kW]
Q_L	: PVT modülünün toplam ısı kaybı oranı
Q_{PVT}	: PVT panele transfer olan ısı miktarı [kW]
T_{bs}	: Tedların arka yüzey sıcaklığı [°C]
$T_{çevre}$	: Çevre sıcaklığı [°C]
T_f	: Evaporatör sıcaklığı [°C]
$T_{hücre}$	: PV hücrelerinin sıcaklığı [°C]
T_{rc}	: Referans sıcaklığı [°C]
T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı [°C]
$V_{rüz}$	: Rüzgâr hızı [m/s]
W_{komp}	: Kompresör tüketim gücü [kW]
x	: Kuruluk derecesi
σ	: Stefan–Boltzmann sabiti [W/(m ² ·K ⁴)]
ΔT	: Sıcaklık farkı [°C]
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
$(\alpha\tau)_{eff}$	: Geçirgenlik katsayısı
α_b	: Süpürgeliğin emme oranı
σ_{pv}	: PV hücrelerinin absorpsiyon oranı
β_{pv}	: Paketleme faktörü
β_p	: PV hücrelerinin etkinliğinin sıcaklık katsayısı
τ_c	: PV cam kaplamanın geçirgenliği
ρ_l	: Akışkanın sıvı yoğunluğu
ρ_v	: Akışkanın buhar yoğunluğu
$\mathcal{E}_g$	: PVT emisyonu
$\eta_{e,ideal}$	: PV hücrelerinin elektriksel verimliliği
η_{rc}	: 25 C'deki PV hücrelerinin standart fotovolttaik verimlilik değeri
λ	: Doldurma oranı
v	: Akışkanın özgül hacmi [m ³ /kg]

Kısaltmalar

A	:	PVT modülünün alanı
COP	:	Performans katsayısı
EES	:	Engineering Equation Solver (Mühendislik denklem çözücüsü)
EVA	:	Etilen vinil asetat
G	:	Güneş ışınlamı
GEPA	:	Güneş enerjisi potansiyeli atlası
GWP	:	Küresel ısıtma potansiyeli
IP	:	Isı pompası
IEA	:	Uluslararası Enerji Ajansı
ODP	:	Ozon tabakasına zarar verme etkisi
P	:	Basınç
PV	:	Fotovoltaik panel
PVT	:	Fotovoltaik termal panel
SAHP	:	Güneş enerjisi destekli ısı pompası
SM	:	Soğutma makinesi
W	:	Güç
T	:	Sıcaklık

1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihi boyunca hayati bir rol oynamıştır, çünkü insanlar temel ihtiyaçlarını karşılamak, toplumlarını ilerletmek ve teknolojik ilerlemeler kaydetmek için enerjiye bağımlı hale gelmiştir.

Enerji kullanımıyla birlikte önemli bir gelişim süreci yaşanmıştır. İlk zamanlarda, enerjiyi ateş yakarak ve güneş ışığından faydalanarak elde etmek zorunda kalan insanlar, endüstri devrimiyle birlikte büyük bir değişim yaşamıştır. Enerji talebi hızla artarken, fosil yakıtların keşfi enerji üretiminde büyük bir dönüşüm sağlamıştır. Fosil yakıtlar, yüksek enerji depolama kapasiteleri ve kolay erişilebilirlikleri nedeniyle sanayi, ulaşım ve evlerde temel enerji kaynağı haline gelmiştir. Ancak, fosil yakıtların sera gazı emisyonları ve çevresel etkileri, küresel iklim değişikliği ve çevre sorunları gibi önemli zorluklara neden olmuştur. Günümüzde ise enerji kaynaklarının akılcı kullanımına son derece önem verilmektedir (Hawlder ve Jahangeer, 2006). Konvansiyonel enerji kaynaklarının çevre üzerindeki istenmeyen etkileri ve bu kaynakların bir kısmının tükenmesi, güneş enerjisi gibi kirlilemeyen, tükenmeyen ve sahaya bağlı enerji kaynaklarının kullanımına ilgiyi artırmıştır (Elhadidy ve Shaahid, 2000). Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji, sınırsız ve çevre dostu olmaları nedeniyle enerji üretimi için geleceğin öncelikli tercihi olarak kabul edilmektedir.

Yenilenebilir enerji, gelecek nesillere temiz bir çevre bırakma ve enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir bir şekilde karşılama potansiyeline sahiptir. Böylece bu kaynakların geliştirilmesi ve kullanımının artırılması gerekmektedir. Son yüzyılda bu konu giderek daha da önem kazanmıştır. Aynı zamanda yenilenebilir enerji, birçok avantajı beraberinde getirir ve enerji sektöründe önemli bir dönüşüm sağlar. Öncelikle, sınırsız doğal kaynaklardan elde edildiği için enerji güvenliği sağlar ve enerji arzını çeşitlendirir. Ayrıca, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve enerji maliyetlerini düşürür, hava kirliliğini azaltır, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar ve ekosistemlere zarar verme riskini azaltır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımının artırılması, sürdürülebilir bir enerji geleceği için kritik bir adımdır.

Bu adımın başarıyla gerçekleştirilmesi için politik destek, teknolojik ilerlemeler, finansal yatırımlar ve toplumun enerji bilincinin artırılması gerekmektedir. Bu önemli

unsurların bir araya gelmesiyle, enerji sektöründe dönüşüm sağlanarak sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru ilerlenebilir.

Güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha avantajlıdır. Güneş enerjisi, neredeyse her yerde enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. Alternatif sistemlerin kullanımının artmasıyla birlikte, konut ısıtması ve kullanım suyu ısıtmasında, su ve enerji tasarrufu sağlama önemi giderek artmaktadır. Bu eğilimin arkasındaki ana faktörlerden biri, temiz ve sonsuz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin kullanımının yaygın olarak kullanılmasıdır.

Güneş enerjisiyle ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamaktır. Güneş enerjisinden farklı şekillerde faydalanılabilir. Güneş kolektörleri gibi sistemlerle termal enerji elde edilebilir veya fotovoltaik (PV) paneller kullanılarak elektrik enerjisi üretilir. PV teknolojileri, sürekli teknik gelişmelerle birlikte enerji tasarrufu ve çevre koruma kaygılarının artmasıyla büyük bir potansiyele sahip olmuştur. Bu ilerleme, fosil yakıt tüketiminin azalmasına ve karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli bir katkı sağlayacaktır. Son yıllarda, fotovoltaik termal (PVT) kolektörlerin kullanımı artmıştır. Bu kolektörler sayesinde güneş enerjisinden hem elektrik hem de termal enerji bir arada elde edilebilmektedir.

Güneş enerjisi kullanımı, sıcak su üretimi, elektrik üretimi, hacimli ısıtma ve soğutma gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Bu uygulamalar genellikle ayrı ayrı sistemlerle gerçekleştirilir. Ancak günümüzde, birden çok uygulamanın entegre edildiği sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar ivme kazanmıştır. Güneş enerjisini daha verimli ve kullanışlı hale getirmek amacıyla izlenebilecek en iyi yollardan biri, bu enerjiyi ısı pompasıyla entegre ederek sistem oluşturmaktır. Bu bütünsel (entegre) sistem, kışın ısıtma, yazın soğutma, kullanım suyu ısıtma ve evlerin elektrik talebinin bir kısmı gibi ihtiyaçları karşılamaktadır. Bu nedenle çok işlevli sistemden konut binalarına enerji sağlamak için güneş enerjisinden ve ısı pompasından tam olarak yararlanılabilir.

Hacim ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi gibi amaçlarla güneş enerjisiyle çalışan ısı pompaları hakkında uzun yıllardır pek çok çalışma yürütülmüştür. Güneş enerjili ısı pompası sistemleri, ısı pompası teknolojilerini güneş enerjisi uygulamalarıyla entegre ederek birçok avantajı bir araya getirebilir. Bu tür uygulamalar, ısı pompasının performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda güneş enerjili düşük sıcaklık uygulamaları için mükemmel bir seçenek sunar. Isı pompasının performans katsayısı

(COP) çalışma sıcaklıkları ile doğrudan ilişkilidir. Isı pompasının dış ünitesindeki evaporatörün ısı aldığı ortamın (hava veya su) sıcaklığı, PVT panellerden çekilen ısı ile artırılabilirse ısı pompasının COP değeri de artar.

PVT ve ısı pompası birleşimi, güneş enerjisinden hem elektrik üreten fotovoltaik panellerden hem de ısıtma ve soğutma için kullanılan bir ısı pompasından faydalanarak enerji verimliliğini artırmak amacıyla bir araya getirilen bir sistemdir. Bu bütünleşik sistem, güneş enerjisini hem elektrik üretiminde hem de termal enerji kullanımında daha etkin bir şekilde kullanmamızı sağlar.

Bu birleşik sistemler, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kullanımını teşvik etmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanır. Elektrik enerjisi üreten fotovoltaik panellerin yanı sıra ısı enerjisini de kullanmak, enerji verimliliğini artırır ve toplam enerji tüketimini azaltır. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların kullanımını azaltarak sera gazı emisyonlarını ve çevresel etkileri azaltmaya katkı sağlar.

Bu yenilikçi enerji çözümü olan sistemler, enerji tasarrufu, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar sunar. Bu sistemlerin daha fazla geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, enerji sektöründeki dönüşüm sürecine katkıda bulunacak ve gelecekte daha sürdürülebilir bir enerji sistemi geçişine önemli bir adım olacaktır.

Kırtepe ve Güngör (2017) yapmış oldukları literatür karşılaştırmasında (Çizelge 1.1) PVT'li sistemlerle ilgili yapılan çalışmalarda en düşük toplam verimliliğin (termal+elektriksel) %30 oranında olduğunu belirlemişlerdir. Bu yüzden bu konu, güncel araştırma alanlarından biri olarak kabul edilmekte olup, yeni çalışmalarla sürekli gelişmektedir. Isı pompası ve PVT sistemlerinin kombinasyonundan oluşan bütünleşik sistemin veriminin daha yüksek olması öngörülmektedir. Ülkemizde PVT sistemlerinin verimliliğini artıracak bu tür uygulamaların teşvik edilmesi önemlidir. Özellikle bütünleşmiş projeler aracılığıyla elektrik üretimi, hacim ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimi gibi alanlarda Ar-Ge faaliyetlerine öncelik verilmelidir.

Çizelge 1.1: PVT ile yapılan bir kısım çalışmaların karşılaştırılması (Kırtepe ve Güngör, 2017)

Referans	Yıl	Çalışmanın yapısı	PVT'nin yapısı	PVT'de kullanılan soğutucu akışkan	Çalışmanın amacı	PV'nin termal verimliliği (%)	PV'nin elektriksel verimliliği (%)	Sistem toplam verimliliği (%)
Sophian ve diğ.	1996	Teorik	Hava ile soğutmalı	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	24-34	6-9	30-45
Solanki ve diğ.	2009	Deneyssel	Hava ile soğutmalı	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	42	8,4	50
Kim ve diğ.	2014	Deneyssel	Hava ile soğutmalı	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	22	15	-
Saygın ve diğ.	2016	Deneyssel	Hava ile soğutmalı	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	48	11,5	57
Dubey ve Tiwari	2008	Deneyssel ve Teorik	Su ile soğutmalı	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	33-64	-	-
Kabul ve Duran	2014	Deneyssel	Su ile soğutmalı	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Othmna ve diğ.	2016	Deneyssel	Su ve Hava ile soğutmalı	Su ve Hava	Elektrik, sıcak su ve hava üretimi	76	17	
Ji ve diğ.	2009	Deneyssel ve Teorik	Isı pompalı	R22	Elektrik ve sıcak su üretimi	68,1	14,5	-
Xu ve diğ.	2009	Teorik	Isı pompalı	R22	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Zhao ve diğ.	2011	Teorik	Isı pompalı	R134a	Elektrik, sıcak su üretimi ve hacim ısıtma	55,58	19,03	70,14
Chen ve diğ.	2011	Deneyssel	Isı pompalı	R134a	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Wang ve diğ.	2015	Deneyssel	Isı pompalı	R22	Elektrik, sıcak su ve hava üretimi	36	14,5	-
Wu ve diğ.	2011	Teorik	Isı borulu	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	63,65	8,45	-
Gang ve diğ.	2012	Teorik	Isı borulu	Amonyak-Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Gang ve diğ.	2012	Deneyssel ve Teorik	Isı borulu	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	45,7	10,2	51,5
Zhang ve diğ.	2013	Deneyssel ve Teorik	Isı borulu	Su-Glikol	Elektrik ve sıcak su üretimi	40	10	50
Moradgholi ve diğ.	2014	Deneyssel	Isı borulu	Metil alkol-Aseton	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	14	48,37

Ayrıca küresel ısınma nedeniyle, konutlar için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan klima sistemlerinin geliştirilmesi önemli hale gelmektedir. Çünkü dünyada kullanılan enerjinin %40'ı binalarda tüketilmektedir (Gholamian ve diğ., 2022). Mimarlar ve mühendisler enerji verimli binalar için çözüm arayışlarına devam etmektedirler. 2013'ten itibaren Fransa'daki her yeni binanın ısıtma-soğutma, aydınlatma, sıcak su ihtiyacının ortalama 50 (kWhPE/m²)/yıl olması ve bunun en az 5

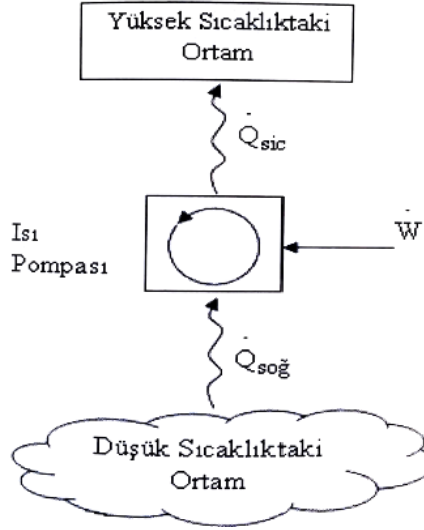
(kWhPE/m²)/yıl miktarının (yani %10'unun) da yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanıyor olması istenmektedir (Auzenet ve diğ., 2013). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2050 yılında sıcak su ve ortam ısıtması ihtiyacının %14'ünün güneş kolektörleri ile sağlanacağı tahmin edilmektedir.

1.1. Isı Pompaları

Atık ısıyı tekrar kullanma kabiliyeti sayesinde ısı pompası sistemleri, çevre dostu ve etkili ısıtma-soğutma çözümleri sunan bir sistem olarak bilinir ve evlerden endüstriyel tesislere kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Bazı ülkelerde, ısı pompaları ısıtma uygulamalarının büyük bir bölümünü oluşturur ve bu pazarın önemli bir kısmını kaplar (Brown, 2009).

Deneyler, ısı pompalarının sera gazları, özellikle karbondioksit emisyonlarını ciddi bir şekilde azaltma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Enerji geri kazanımı sistemlerinde, ısı pompalarının yüksek düzeyde enerji tasarrufu sağlama kabiliyetleri nedeniyle kilit bir bileşen olduğu ifade edilebilir. Isı pompaları, iç mekanları ısıtmak ve sıcak su sağlamak için kışın kullanılabileceği gibi, yaz aylarında ise soğutma ve nem alma işlemleriyle yıl boyunca iklim kontrolü sunar. Özellikle toprak ve dış hava, her daim bir miktar ısı içerdiğinden, ısı pompaları soğuk kış günlerinde dahi bir konutu ısıtma yeteneğine sahiptir.

Bu sistemler, ısıtma ve soğutma amaçlarıyla kullanılabilir. "Isı pompası" terimi ısıtma işlemini tanımlarken, soğutma işleminde ise "soğutma makinesi" terimi kullanılır. Temel olarak, ısı pompası elektrik enerjisini kullanarak bir yerden diğerine ısıyı taşımak için çalışan bir sistem olarak tanımlanır. Bilindiği üzere enerji vardan yok, yoktan da var edilemez, yalnızca biçim değiştirir. Isı pompalarının temel işlevi ısıyı taşımaktır. Bu sistemler, düşük sıcaklıklı bir kaynaktan ısıyı alır ve yüksek sıcaklıklı bir mekâna verir. Bu işlem, termodinamik bir çevrimi kullanır ve dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere ısı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir ortamdan daha yüksek sıcaklıkta bir ortama ısı transferini gerçekleştirir, bu da doğal ısı transferinin tersidir.



Şekil 1.1. Isı pompası termodinamiği (Yamankaradeniz ve diğ., 2017)

Isı pompalarında, toprak, su, hava, güneş enerjisi ve atık ısılar gibi çeşitli kaynaklar temel olarak kullanılır. Bu ısı kaynakları ve sıcaklık aralıkları Çizelge 1.2’de sunulmuştur. Kaynak seçimi, bölgeye ve kullanım amacına bağlı olarak yapılır. Kaynağın kararlılık açısından mümkün olduğunca istikrarlı olması önemlidir. Bu kaynaklar arasında toprak, en kararlı olanıdır. Ancak, toprak kaynaklı sistemlerin yüksek ilk yatırım maliyetleri nedeniyle hava kaynaklı cihazlara olan talep artmaktadır. Son yıllarda, kompresör teknolojisinin ilerlemesi ve çeşitli soğutucu gazların kullanımı, hava kaynaklı cihazların daha uygun maliyetli ve kolay erişilebilir olmasına yol açmıştır.

Çizelge 1.2. Isı pompalarında kullanılan ısı kaynakları ve sıcaklık aralıkları (Erdoğan ve diğ., 2006)

Isı kaynağı	Sıcaklık aralığı (°C)
Dış hava	-10-15
Atık hava	15-25
Yeraltı suyu	4-10
Göl	0-10
Nehir	0-10
Deniz	3-8
Kayaçlar	0-5
Toprak	0-10
Atık su veya sıvılar	>10

Isı pompası, temel olarak ısı makinesinin ters çevrimi olarak düşünülebilir. İki sistem arasındaki temel fark, ısı makinesinin yüksek sıcaklık ortamından ısı çekerek düşük sıcaklık ortamına aktarması ve bu süreçte iş üretmesi, ısı pompasının ise dışarıdan

verilen enerji ile düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan ısı alıp yüksek sıcaklık ortamına taşınmasıdır.

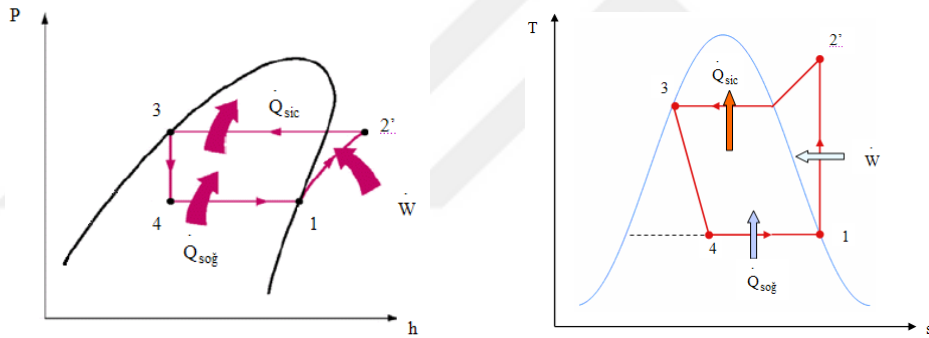
Çoğu ısı pompası, buhar sıkıştırma prensibine dayalı bir çalışma prensibi izler. Temel bir ısı pompasının bileşenleri evaporatör, kompresör, kondenser ve genleşme valfidir.

Evaporatör: Soğutucu akışkanın soğutulacak ortamdaki çevreden ısıyı alarak düşük sıcaklıkta buhar haline gelmesini sağlar.

Kompresör: Buhar haldeki soğutucu akışkanı sıkıştırır ve yüksek sıcaklıkta kızgın buhar haline getirir.

Kondenser: Soğutucu akışkanın sıvılaştırıldığı ısı eşanjörüdür. Burada soğutucu akışkan ısını ısıtılacak ortamdaki çevre havasına vererek yoğuşur.

Genleşme valfi: Yoğuşan sıvının basıncının ve sıcaklığının düşürüldüğü elemandır. Genleşme valfinden çıkan alçak basınçtaki sıvı-buhar karışımı evaporatöre gönderilir.



Şekil 1.2. Isı pompası çevriminin P-h ve T-s diyagramı (Anonim-1)

Şekil 1.2’de T-s ve P-h diyagramlarından da görüldüğü gibi çevrimi oluşturan hal değişimleri şu şekildedir:

- 1 – 2’: Kompresörde izentropik sıkıştırma
- 2’ – 3: Kondenserde sabit basınçta ısıtılacak ortamdaki çevreye ısı geçişi
- 3 – 4: Genleşme valfinde sabit entalpide genişleme
- 4 – 1: Evaporatörde sabit basınçta akışkana soğutulacak ortamdan ısı geçişi

Buharlaştırıcıdan çıktıktan sonra izentropik olarak kompresörde sıkıştırılan doymuş buhar, daha yüksek basınç ve sıcaklık seviyesine getirilerek kızgın buhar haline dönüştürülür (1-2 durumu). Kızgın buhar yoğuşturucuya girer ve kullanılabilir ısını

dışarıya vererek sabit basınçta yoğuşur (2-3 durumu). Yüksek basınçlı doymuş sıvı akışkan, genişleme vanasında basıncı ve sıcaklığı buharlaştırıcı şartlarına düşürülür (3-4 durumu). Akışkan buharlaştırıcıya girdiğinde, ısı kaynağından daha düşük bir sıcaklığa sahiptir, bu nedenle ısı kaynağından akışkana sabit basınçta ısı transferi gerçekleşir ve akışkan buharlaşır (4-1 durumu). Bu noktadan sonra çevrim tekrar başlar ve bu şekilde devam eder.

1.1.1. Isı pompalarının tarihçesi

Isı pompasının temel prensibi, ilk kez 1824 yılında Sadi Carnot tarafından ortaya atılmıştır. Buhar sıkıştırımlı bir soğutucu, Jakob Perkins tarafından 1832 yılında tasarlanmıştır. 19. yüzyılda gazların sıcaklık ve basınç ilişkisi üzerine yapılan çalışmalar, ısı enerjisinin daha yüksek sıcaklıklara pompalanabileceği fikrini ortaya çıkarmıştır. Soğutma çevriminin ev ısıtmasında kullanılabileceğini belirten Lord Kelvin (W. Thomson) ise 1852 yılında bu prensibi daha da geliştirmiştir.

1851 yılında Dr. John Gorrie, Amerika'da ticari olarak üretilen ilk soğutma makinesinin patentini almıştır. Ferdinand Carre ise Fransa'da 1851 yılında ilk amonyak absorpsiyon ünitesini tasarlamıştır. İsviçre'de ise Salina Bex'de mühendis Paul Piccard tarafından 1870-1880 yılları arasında sıkıştırılmış buharla çalışan bir ısı pompası prensibi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

İskoçyalı Haldane tarafından 1930 yılında yapılan ve evinde kullanmaya başladığı ilk ısı pompası, havayı kaynak olarak kullanmış ve kötü hava koşullarında su kullanılmıştır. 1950'lerde ısı pompasına artan bir ilgi olsa da petrol fiyatlarının düşmesi ve işletme zorlukları nedeniyle popülerlik kazanamamıştır.

1912 yılında İsviçre patenti ile toprak kaynaklı ısı pompalarının faydaları ilk kez tanıtılmıştır. Daha sonra, 1940'lı yıllarda, toprağa gömülü metal serpantinler aracılığıyla salamura dolaştırılarak, termodinamik avantajı çarpıcı bir şekilde gösterilmiştir. Ancak serpantinlerin korozyon sorunları, toprak kaynaklı serpantinlerin kullanımını zorlaştırmış ve hava kaynaklı ısı pompasının gelişimini teşvik etmiştir. Daha sonra plastik boruların kullanılmasıyla korozyon sorunları aşılmış ve çalışmalar hız kazanmıştır.

1950'lerde Amerika ve İngiltere'de, ev kullanımı amaçlı ısı pompalarıyla ilgili toprak kaynağına dayalı çalışmalar başlamıştır. Örneğin, Baker, 1950-1951'de, kış aylarında ortalama bir ısıtma etkinlik katsayısı (COP) değeri olan 3'ün üzerine çıkan çift etkili toprak kaynaklı bir ısı pompası geliştirmiştir.

1954 yılında Jordan ve Threlkeld, 1956 yılında ise AEIC-EEI Isı Pompası Komitesi, güneş enerjisi destekli ısı pompaları üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Albuquerque'deki bir ofis binası, güneş enerjisi kolektörleri ve ısı pompası sistemleri ile ısıtılmış ve soğutulmuştur. Bu yenilikçi sistem daha sonra konutlarda yaygın bir şekilde benimsenmeye başlamıştır.

1950'lerden 1960'lara kadar olan dönemde, düşük kaliteli ısı pompaları, zorlu kış koşullarında istenilen performansı gösteremeyerek pazar açısından dezavantajlı hale gelmiştir. Bu durum, ısı pompası sektörünün ilerlemesini olumsuz etkilemiştir. Ancak, yeni teknolojilerin kullanılması ve 1973-1974 yıllarında petrol fiyatlarının yükselmesi gibi etkenlerle, ısı pompaları yeniden büyük ilgi görmeye başlamıştır.

1.1.2. Kaynak çeşitlerine göre ısı pompaları

1.1.2.1. Toprak kaynaklı ısı pompası

Topraktan ısı elde etmek için iki farklı yöntem vardır: dikey tip ve yatay tip toprak kaynaklı ısı pompaları. Toprak, yıl boyunca nispeten sabit bir sıcaklıkta bulunur. Isıtma mevsiminde, dış hava sıcaklığına göre daha yüksek bir sıcaklıkta, soğutma mevsiminde ise dış hava sıcaklığına göre daha düşük bir sıcaklıkta kalır. Bu, daha istikrarlı bir enerji kaynağı sunar.

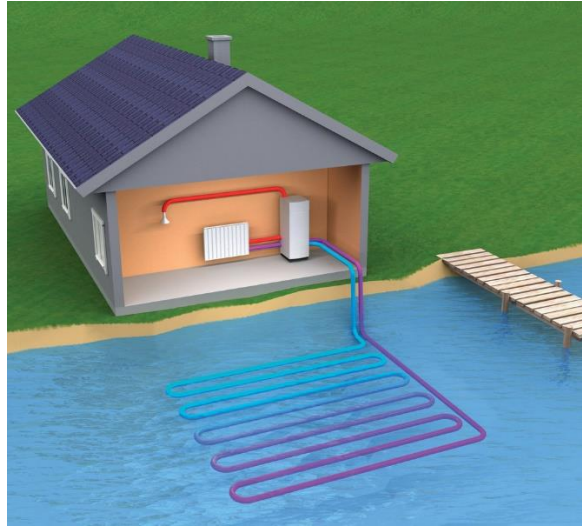
Toprak kaynaklı sistemler, enerji temininde toprağı kullanır. Güneş ışınlarının doğrudan veya dolaylı olarak toprağı ulaşması, toprakta enerji birikimine yol açar, bu birikim yaklaşık 1,2-1,5 metre derinliğe kadar sürer ve toprak bu enerjiyi saklar. Ek olarak, toprak, dünyanın çekirdeğinden gelen ısı transferi ile ısınır. Ancak bu ısı transferi, yüzeye yaklaştıkça azalır ve yüzeyde 2 metreye kadar neredeyse sıfıra yaklaşır. Toprak kaynaklı ısı pompaları, topraktan ısıyı buharlaştırıcılarında çeken sistemlerdir. Bu sistemlerde toprağın altına döşenen boru sistemine "toprak ısı değiştiricisi" adı verilir. Bu borular aracılığıyla, toprağın sıcaklığı ısı taşıyıcı akışkanla değiştirilir. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi toprak ısı değiştiricileri, toprağı yatay veya dikey olarak yerleştirilebilir, bu seçim ise toprağın bileşimi, nemi, yoğunluğu ve gömme derinliği gibi faktörlere bağlıdır. Toprağın ısı kaynağı olarak kullanılması, hava veya su kaynaklı sistemlere kıyasla daha yüksek kurulum maliyeti gerektiren bir sistemdir.



Şekil 1.3. Boruların yatay ve dikey yerleşimi (Anonim-2, 2020)

1.2.1.2. Su kaynaklı ısı pompası

Eğer yeraltı suları sürekli bir akışa sahip ve erişilebilir bir şekilde toprak altında, gölette, nehirlerde veya benzeri yerlerde bulunuyorsa, bu su kaynakları ısı elde etmek için kullanılabilir. Bu tür bir sistem için ideal su sıcaklığı genellikle $+8$ ila $+12$ derece arasında olmalıdır. Bu sistemlerde, bir kuyu kazılarak yeraltı suyu çekilir, ısı pompasında kullanılır ve daha sonra tekrar doğaya verilir. Ülkemizde yeraltı sularının sıcaklıklarının sıklıkla 0 °C'nin altına düşmemesi büyük bir avantajdır. Ayrıca, denizlerimizin 25-50 metre derinliklerinde su sıcaklığının genellikle yaklaşık 8 °C olması, uygun sıcaklık koşulları sağlar.



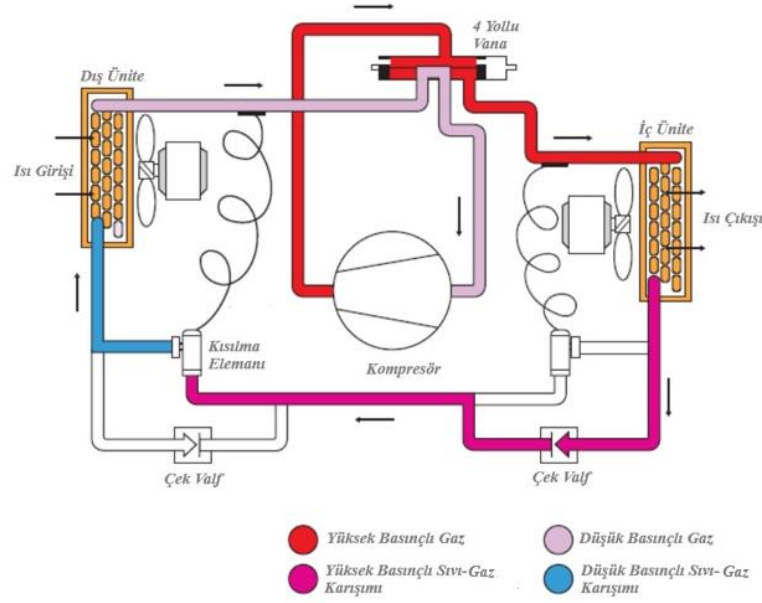
Şekil 1.4. Su kaynaklı ısı pompası

1.2.1.3. Hava kaynaklı ısı pompası

Hava kaynaklı ısı pompaları, içerisinde bulunduğumuz mevsime bağlı olarak, çevredeki hava enerjisini kullanarak ısıtma veya soğutma işlemleri gerçekleştiren sistemlerdir. Havadan havaya ısı pompası olarak adlandırılan en yaygın tip, havadan ısıyı alır ve bu ısıyı evin içine veya dışına aktarır. Diğer bir tür olan havadan suya ısı pompası ise su dolaşımı ile ısı dağıtımı yapılan alanlarda kullanılır. Isı pompası, ısıtma mevsiminde dış ortamdaki havadan ısıyı alarak evin su dağıtım sistemindeki suyu ısıtır. Soğutma mevsiminde ise bu işlem tersine döner, yani evin içindeki sıcaklığı düşürmek için içerideki ısıyı dışarı atar. Hava kaynaklı ısı pompalarının en büyük zorluğu, düşük dış hava sıcaklıklarında verimliliklerinin azalmasıdır. Hava kaynaklı ısı pompaları, dışarıdaki havadan alınan ısıyı kullanarak evdeki ısıtma sistemlerini, radyatörleri, yerden ısıtma sistemlerini veya sıcak hava konvektörlerini beslemek için kullanır. Bir hava kaynaklı ısı pompası, hava sıcaklığı -25 °C'ye kadar düştüğünde bile ısı alabilir. Isı pompalarının çalışması için elektrik gerektiğinden çevreye bir miktar olumsuz etkisi vardır, ancak topraktan, havadan veya sudan alınan ısı sürekli doğal olarak yenilenir.

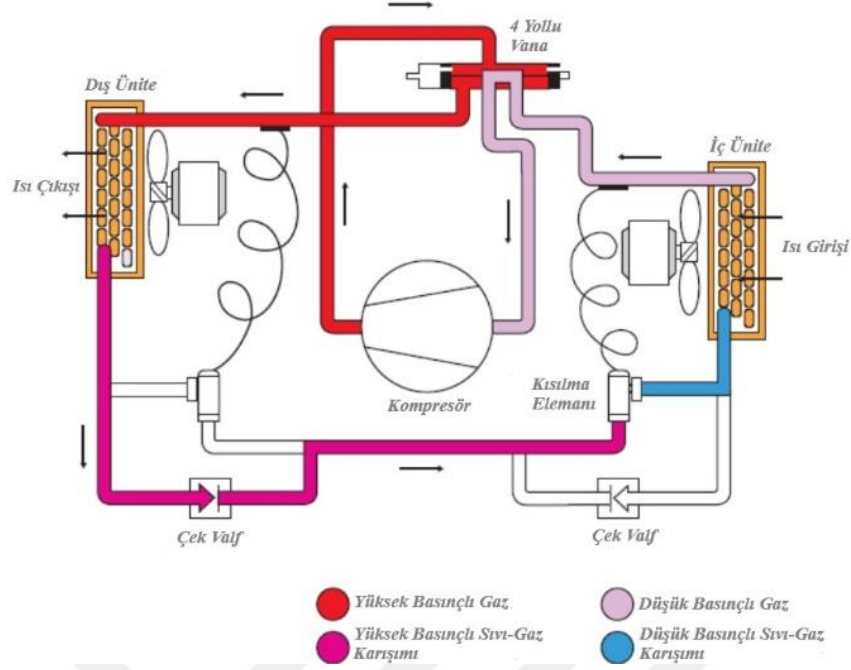
Hava kaynaklı ısı pompalarının 3 çevrimi vardır. Bunlar ısıtma, soğutma ve buzlanmayı önlemek için yapılan defrost çevrimidir.

- Şekil 1.5'te, hava kaynaklı ısı pompasının ısıtma çevrimi görülmektedir. Isıtma çevrimi, kızgın buhar halindeki soğutucu akışkan, ısıtma çevriminde kompresörden çıktıktan sonra kondensere yönlendirilir. Burada akışkan, odaya ısı vererek yoğunlaşır ve basıncı düşürülmek üzere genleşme valfinden geçirilerek evaporatöre gönderilir. Dış ortam havasından ısı çeken akışkan buharlaşarak tekrar kompresöre yönlendirilir. Evaporatörden gelen buhar, dört yollu vanadan geçerek kompresöre gönderilir. Kompresöre yönlendirilen buhar, basıncı ve sıcaklığı arttırılarak sıkıştırılır. Ardından dört yollu vana ile kondensere gönderir. Burada sıcak gaz, sistemde dolaşan suya veya iç havaya ısı transferi yapar. Bu işlem sırasında soğutucu akışkan gaz halinden sıvı hale dönüşür. Son olarak, soğutucu akışkan sıvı haldeyken genleşme valfine girer, bu süreçte basınç ve sıcaklık düşer, genleşme valfinden çıkışta doymuş sıvı-buhar karışımı haline gelir ve buradan evaporatöre gönderilir. Evaporatörde çevreden ısı alarak buharlaşan akışkan dört yollu vanadan geçerek kompresöre gönderilir. Çevrim böyle devam eder.



Şekil 1.5. Hava kaynaklı ısı pompası ısıtma çevrimi (Anonim-3)

- Şekil 1.6’da gösterilen hava kaynaklı ısı pompası soğutma çevrimi, yaz mevsimi boyunca evi serinletmek için ısıtma çevriminin ters yönde çalıştırılması anlamına gelir. Ters çalışma işlemi, dört yollu vana aracılığı ile gerçekleştirilir. Kompresörden gelen sıcak akışkan, dört yollu vana ile kışın iç üniteye kondensere yazın ise dış üniteye evaporatöre yönlendirilir. Soğutma çevriminde, dış üniteye ısı değiştirici (kondenser) görevini üstlenirken iç ünite buharlaştırıcı olarak çalışır. Kompresörden çıkan kızgın buhar halindeki soğutucu akışkan dört yollu vana aracılığıyla dış üniteye yönlendirilir. Burada, dış ortam havasına ısı vererek yoğunlaşan soğutucu akışkan genleşme valfine yönlendirilir. Genleşme valfinde soğutucu akışkanın basıncı düşürülerek buharlaştırıcıya gönderilir. Buharlaştırıcıda ortam sıcaklığını çekerek buharlaşan soğutucu akışkan dört yollu vanadan geçerek tekrar kompresöre yönlendirilir ve bu çevrim sürekli olarak tekrarlanır.



Şekil 1.6. Hava kaynaklı ısı pompası soğutma çevrimi (Anonim-3)

- Defrost çevrimi, yalnızca hava kaynaklı ısı pompalarında görülür. Isıtma çevriminde, hava kaynaklı ısı pompası dış ortamdan ısı çeker ve ısıtılacak ortama transfer ederek ısıtma sağlar. Ancak dış ortam sıcaklığı çok düştüğünde (0°C veya altında), fan hava üflediği için dış ünite ısı değiştiricisindeki nem donar ve buz oluşur. Buz oluşumu, dış hava sıcaklığı ve atmosferdeki nem oranı gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu buz oluşumu sistem üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Buz, hava ile soğutucu akışkan arasındaki ısı transferini azaltır, ısı değiştirici verimini düşürür ve ısı pompasının sistem performansını etkiler. Bu nedenle, oluşan buzun düzenli olarak çözülmesi gereklidir. Bu işleme defrost işlemi denir.

1.2.1.4. Güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası

Hava, toprak, su veya jeotermal enerjilerin yanı sıra güneş enerjisi de ısı pompalarında kullanılabilir. Güneş enerjisi uygulamaları ve ısı pompası teknolojileri, birbirini destekleyerek karşılıklı avantajlar sunmaktadır. Bu uygulamalar, sadece ısı pompasının etkinliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda güneş enerjili düşük sıcaklık uygulamaları için de son derece uygun bir seçenek sunar. Uzun yıllardır güneş enerjisi ile çalışan ısı pompaları üzerinde birçok çalışma yapılmış ve gelişmeler kaydedilmiştir.

Güneş enerjisini kullanan ısı pompası sistemlerinin verimlilik ve uygulanabilirliğini artırmak için, sistemin ısı pompasıyla bütünleşmiş bir şekilde tasarlanması önemli bir adımdır.

1.2. Fotovoltaik Termal Sistemler

Güneş enerjisi sistemleri, doğrudan güneş ışığından elektrik enerjisi elde etmek için kullanılır ve bu şekilde güneşin yaydığı enerjinin değerlendirilmesini sağlar. Güneş ışınlarının içerdiği füzyon reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ısı enerjisi, fotovoltaik sistemler tarafından kullanılır ve depolanır. PVT paneller ile güneş enerjisinden yalnızca elektrik üretmek yerine, ışınların sıcaklığından faydalanarak akışkanlar aracılığıyla daha fazla enerji elde etmek amacıyla mevcut sistemler optimize edilir. Bu şekilde, daha verimli bir sistem oluşturulur ve hem kurulum maliyetleri hem de geri ödeme süresi açısından avantaj sağlanır. Bu tür sistemler aynı zamanda çevreyi koruma ve tükenmekte olan enerji kaynaklarını daha sürdürülebilir bir şekilde kullanma amacına hizmet ederek doğayla uyumlu bir yaşam tarzını destekler.

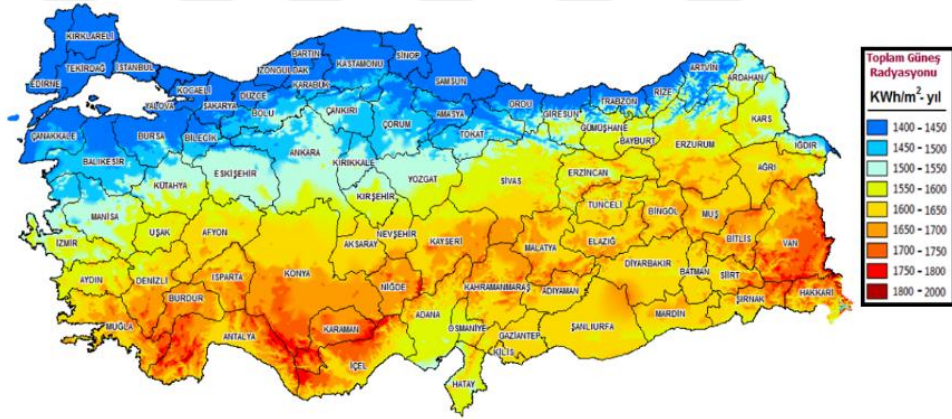
Fotovoltaik (PV) paneller, güneş ışığına ve hava sıcaklığına bağlı olarak çalışırken, panellerin yüzey sıcaklıkları artar. Bu panellerin nominal çalışma koşullarında elektrik üretim verimi %6 ile %18 arasında değişebilir, ancak artan yüzey sıcaklıkları panellerin verimini azaltır. (Zhang ve diğ., 2012). PV panellerinin çalışma sıcaklıklarının yükselmesi ve verimlerinin azalması problemini çözmek için çeşitli uygulamalar denenmiştir. Bu uygulamaların temel amacı, PV panellerinin düşük sıcaklıklarda çalışmasını sağlayarak elektriksel verim kayıplarını önlemektir.

PVT hem elektrik hem de ısı üretmek ve güneş dönüşümünün verimliliğini artırmak için tek bir modülde güneş fotovoltaik hücrelerinden (PV) ve güneş termal bileşenlerinden oluşan hibrit bir teknolojidir (Zhang ve diğ., 2012). PVT paneller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmenin yanı sıra, arka tarafındaki ısıyı da yakalayan ve kullanışlı hale getiren gelişmiş fotovoltaik panellerdir. Bu paneller, fotovoltaik hücrelerin arkasında yer alan bir ısı alıcıya sahiptir. Bu sistemlerde, elektrik enerjisi üretilirken PV panellerinin üzerinde biriken ısıнын uzaklaştırılması ve aynı zamanda ısı enerjisinin kullanılması hedeflenir. Böylece, PV panellerinin üzerindeki ısıyı çekerek elektriksel verim kayıplarının önlenmesi ve aynı zamanda toplam sistem performansının artırılması sağlanır.

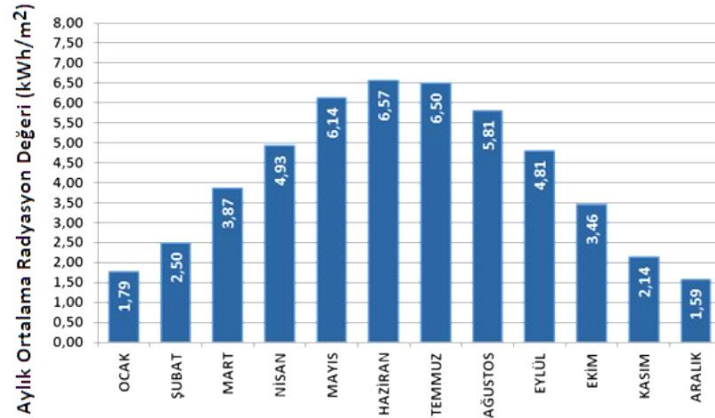
1.2.1. Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, dünyanın en temiz yenilenebilir enerji kaynağıdır ve temel olarak hidrojenin helyuma dönüşmesi sırasında ortaya çıkan ısı enerjisine dayanır. Bu nedenle, güneş enerjisi hidrojenin helyuma dönüşümü ile açığa çıkan ısı enerjisini temsil eder ve bu yüzden dünyanın en temiz yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilir.

Ülkemizin konumu, güneş enerjisi açısından büyük bir potansiyele işaret etmektedir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.741 saat ve ortalama yıllık toplam ışıınım değeri ise 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Şekil 1.7-1.8’de GEPA raporu, ülkemizin genel güneş enerjisi potansiyelini ve aylık ortalama güneş ışıınım dağılımını sunmaktadır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).



Şekil 1.7. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)



Şekil 1.8. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam ışıınım değeri (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre Çizelge 1.3'de 1991-2020 yılları arasındaki ortalama mevsim normalleri verilmiştir.

Çizelge 1.3. Antalya ili ortalama mevsim normalleri (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

ANTALYA	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1930 - 2022)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	10.0	10.7	12.9	16.4	20.6	25.3	28.5	28.4	25.3	20.6	15.5	11.7	18.8
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	14.9	15.6	17.9	21.4	25.7	30.7	34.2	34.1	31.2	26.6	21.3	16.7	24.2
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	6.0	6.4	8.0	11.2	15.3	19.6	22.8	22.8	19.5	15.3	10.8	7.7	13.8
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	5.1	5.8	6.7	8.0	9.8	11.4	11.8	11.3	9.8	7.9	6.3	4.9	8.2
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	12.57	10.53	8.61	6.49	5.17	2.55	0.54	0.56	1.72	5.49	7.45	11.91	73.6
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	234.9	151.8	91.7	49.3	32.4	11.0	4.5	4.4	17.1	71.5	129.5	256.8	1054.9

1.2.2. Fotovoltaik paneller

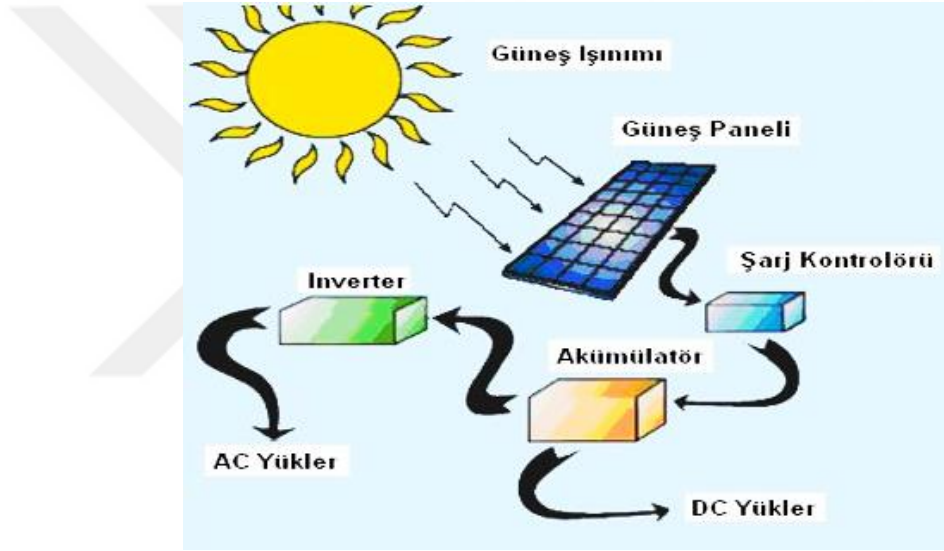
Fotovoltaik sistemler, doğrudan güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fotovoltaik etkinin keşfi, 1839 yılında Fransız fizikçi Becquerel tarafından gerçekleştirildi. Becquerel, elektrolit içindeki gerilimin ışıktan kaynaklandığını gözlemleyerek fotovoltaik etkinin sıvı ortamda fark edilmesini sağladı. Daha sonraki çalışmalar, 1914 yılında %1 verimli fotovoltaik pillerin üretildiğini gösterse de etkili bir elektrik üretilemedi. 1956 yılında Chaplin ve Fuller, %6 verimli fotovoltaik piller üreterek elektrik üretimine katkıda bulundular. Bu çalışmalar, fotovoltaik sistemlerin gelişimine önayak olmuş ve güneş ışığından elektrik enerjisi üretme potansiyelini ortaya koymuştur.

Fotovoltaik paneller, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan teknolojik cihazlardır. Bu paneller, taşınabilir, kullanımı kolay, estetik görünümlü ve düşük bakım gerektiren, yarı iletken cihazlardır. Güneş panelleri, elektrik enerjisinin gerektiği herhangi bir uygulama için kullanılabilir. Güneş panelleri, bir dizi bileşenle bir araya getirilerek fotovoltaik bir sistem oluşturabilir. Şekil 1.9'da sunulan bu sistem, aküler, inverterler, akü şarj kontrol cihazları ve çeşitli elektronik destek devrelerini içerir. Bu sistemler, elektrik şebekesi bulunmayan ve jeneratör kullanımının zor olduğu yerleşim bölgelerinde ekonomik bir çözüm sunarlar.

Elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik panellerin performansını en çok etkileyen faktörlerden biri, panellerin çalışma sıcaklığıdır. Panellerin sıcaklığı arttıkça, elektrik enerjisi üretim verimliliği düşer. Fotovoltaik paneller, genellikle çalışma sırasında ortam

sıcaklığına göre daha yüksek sıcaklıklara maruz kalır ve bu durum doğrudan elektrik üretimini etkiler. Fotovoltaik panellerin sıcaklığını etkileyen en önemli çevresel etkenler, hava sıcaklığı ve rüzgâr hızıdır. Panelin bulunduğu çevre koşulları, panel sıcaklığını belirleyen temel etkenlerdir (Rüstemli ve diğ., 2012).

Ortam sıcaklığı arttıkça, fotovoltaik panellerin elektrik enerjisi üretimi azalırken, rüzgâr hızındaki artış ise panelin verimini artırabilir. Bu değişikliğin kaynağı, panel sıcaklığının yükselmesi ile fotovoltaik panellerde akımın sınırlı artış göstermesine karşın, güç üretiminin önemli bir şekilde azalmasının nedeni, genellikle panellerdeki gerilim düşüşüdür. Bu nedenle, fotovoltaik panellerin çevresel koşulları, panellerin performansı üzerinde büyük bir etki yaratır.



Şekil 1.9. Fotovoltaik sistem görünümü (Dinçadam, 2008)

1.2.2.1. Kristal silikon güneş panelleri

Mono kristal güneş panelleri, tek bir kristal yapısından oluşan ve düz renkte görünen güneş hücrelerinden oluşur. Bu paneller, Czochralski yöntemi adı verilen bir sistemle üretilirler. Polikristal güneş panelleri ise erimiş silikon kabın içine yerleştirilen silikon kristali tohumuyla yapılan ve basit bir soğutma süreciyle elde edilen panellerdir. İnce film güneş panelleri ise mono ve polikristal panellere kıyasla farklı bir teknoloji kullanır. Düz siyah bir görünüme sahip olan bu paneller, fotovoltaik maddenin katı bir yüzeye, genellikle cam veya benzeri bir materyale bırakılmasıyla elde edilir. Ancak ince film güneş panelleri diğer türlerine göre daha düşük bir verimliliğe sahiptir.

Mono kristal güneş panelleri, yüksek verimlilik oranıyla öne çıkar ve yerden tasarruf sağlar. Ayrıca uzun ömürlü yapılarıyla tercih edilen güneş panelleri arasındadır ve genellikle 20 yıl gibi bir garanti süresine sahiptir. Polikristal güneş panelleri ise genellikle mono kristal panellere kıyasla daha düşük verimliliklere sahiptir, ancak daha uygun bir fiyat sunar. Polikristal panellerin karakteristik özelliği ise mavi bir renge sahip olmasıdır. Her iki tür güneş paneli de silikon malzemeden üretilir.



Şekil 1.10. Mono kristal güneş paneli ve hücresi (sağda), polikristal güneş paneli ve hücresi (solda) (Mesquita ve diğ., 2019)

1.2.2.2. İnce film güneş panelleri

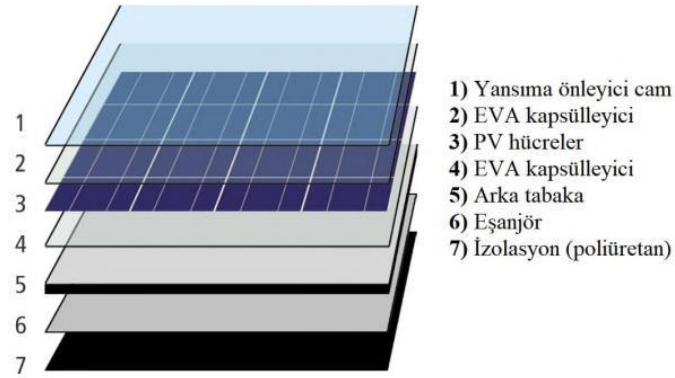
İnce film güneş panelleri, klasik güneş panellerinden farklı olarak tek başına çalışabilen ve bağlantı gerektirmeyen bir tasarıma sahiptir. Bu panelin temel amacı maliyetleri düşürmektir. Amorf silikon teknolojisiyle üretilen ince film paneller, özellikle küçük cihazların ve binaların dış cephe uygulamalarının güç kaynağı olarak tercih edilmektedir. Ancak polikristal veya monokristal panellere kıyasla verimlilik açısından daha düşük performans sergiler.



Şekil 1.11. Dış ortamda kurulumu gerçekleştirilmiş ince film güneş paneli (Uyar, 2016)

1.2.2.3. PVT güneş kolektörleri

PVT güneş kolektörleri, fotovoltaik (PV) ve termal kolektör teknolojilerinin entegre edildiği bir sistemdir. Bir fotovoltaik sistem bileşenleri birkaç unsurdan meydana gelmektedir. Bu bileşenler PV modüller, invertörler, aküler, şarj denetim birimleri ve diğer sistem bileşenlerini içermektedir (Sayın ve Koç, 2011). Sistem, ilk olarak fotovoltaik (PV) hücrelerle güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürerek çalışır. Ardından, termal kolektör arta kalan enerjiyi kullanarak dolaşımdaki suyu ısıtarak hem PV kolektörünün soğutulmasını sağlar hem de sıcak su üretir. Yüksek çevre sıcaklığı, PVT kolektörün normal PV kolektör uygulamalarına göre daha avantajlı hale gelmesini sağlar. PVT kolektör, ekstra faydalar sunar, bu da termal gerilmelerin azaltılmasını içerir ve PV hücre akım-voltaj karakteristiğinin dengelemesine yardımcı olur. (He ve diğ., 2006). Şekil 1.12’de PVT kolektörün şematik gösterimi sunulmuştur.

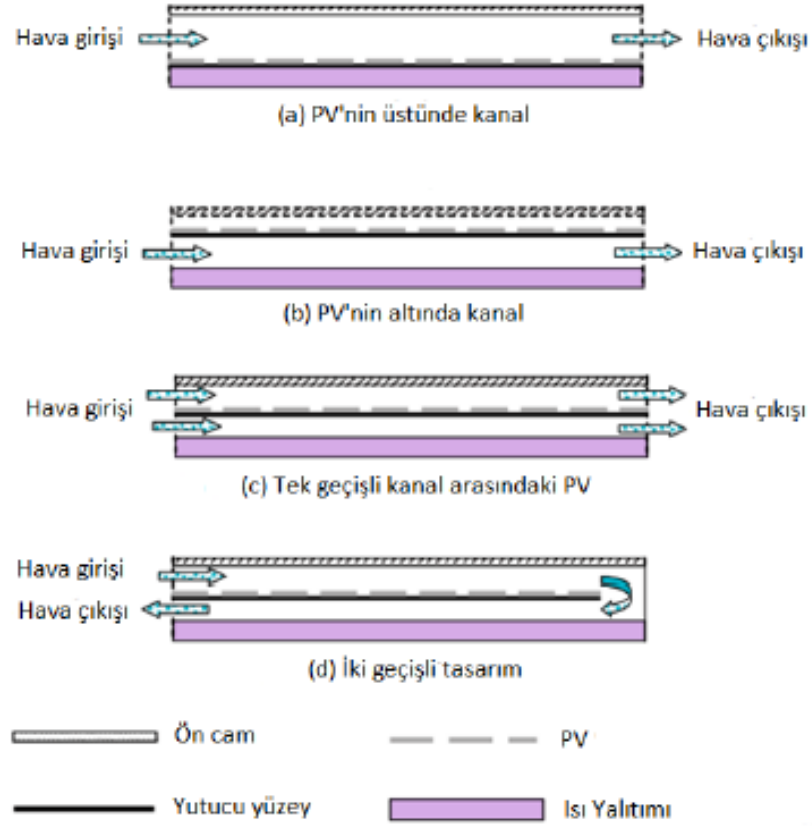


Şekil 1.12. PVT kolektörün şematik gösterimi

PVT sistemleri, kullanılan soğutucu akışkana bağlı olarak dört farklı kategoriye ayrılabilir.

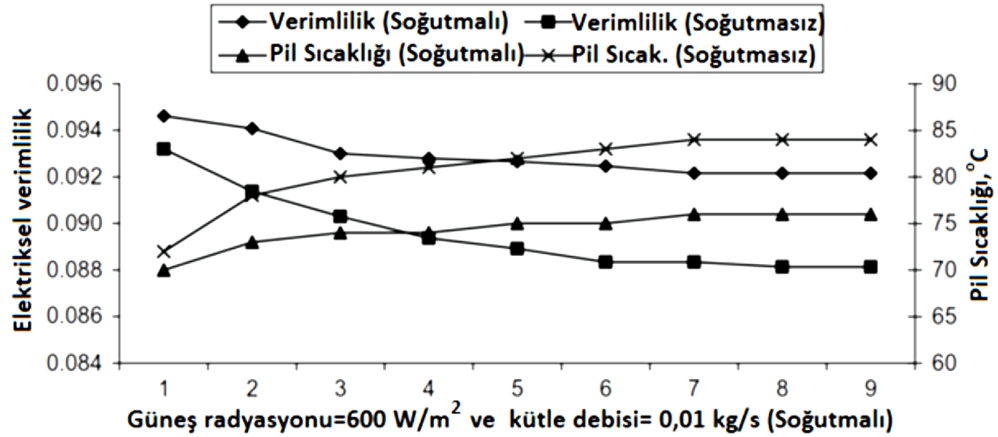
- *Hava ile soğutmalı PVT sistemler,*

PVT’lerde, içerisinde havanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı sistemlerdir. Şekil 1.13’ten de anlaşılacağı üzere, hava farklı geçiş sayıları ve PV panellerine göre değişen konumlarla PVT sistemi içinde dolaşarak soğutma işlemi gerçekleştirir.



Şekil 1.13. Hava ile soğutmalı PVT tasarımları (Chow, 2010)

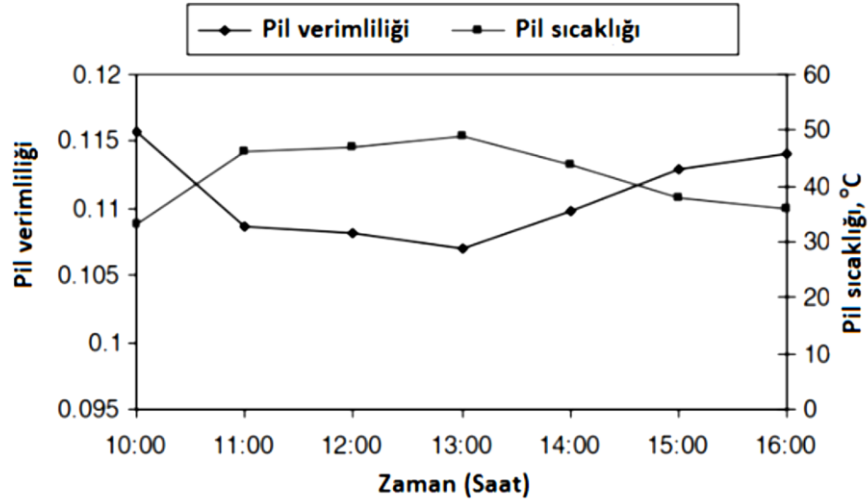
İncelenen veriler, hava ile soğutma işleminin uygulandığı ve uygulanmadığı iki durumu karşılaştırmış ve bu farklılık Şekil 1.14'te görsel olarak sunulmuştur. X eksen, gözlemlerin 30'ar dakikalık zaman aralıklarını temsil etmektedir. Şekilde belirtildiği gibi, soğutma yapılmadığı durumda PV panellerinin sıcaklıkları daha hızlı artar ve bu durum PV verimlerinin daha fazla düşmesine neden olur.



Şekil 1.14. Elektriksel verimlilik ve pil sıcaklığı, soğutmalı ve soğutmasız durumlar arasında değişim (Solanki ve diğ., 2009)

- *Su ile soğutmalı PVT sistemler,*

Hava soğutmalı PVT sistemlerinde havanın düşük yoğunluk, özgül ısı kapasitesi ve ısıl iletkenlik gibi termofiziksel özelliklere sahip olması, PVT teknolojilerinde havanın soğutucu akışkan olarak kullanımına olan ilginin azalmasına neden olmuştur. Bu zayıf termal özellikler, hava tabanlı PVT sistemlerin ısı transfer verimliliğini sınırlamıştır. Sonuç olarak, daha yüksek termal özelliklere sahip su, PVT sistemlerinde soğutucu akışkan olarak deneme amacıyla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu uygulama, PVT sistemlerin genel performansını artırma potansiyeline sahiptir. Şekil 1.15'te pil sıcaklığı-pil verimliliği ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 1.15. PV'lerin sıcaklık ve verimlerinin değişimi (Dubey ve Tiwari, 2008)

- *PVT evaporatörlü (soğutucu akışkan kullanılarak soğutma yapılan) sistemler,*

PVT sistemlerinde su kullanılan sistemlerde, suyun sıcaklığının artması ve bu nedenle PVT sisteminin çalışma sıcaklığının yükselmesi gibi sorunlarla karşılaşılırken, aynı zamanda soğuk iklimlerde suyun donma riski de bulunmaktadır. Bu zorluklar, farklı soğutucu akışkanların PVT sistemlerinde araştırılmasına yol açmıştır.

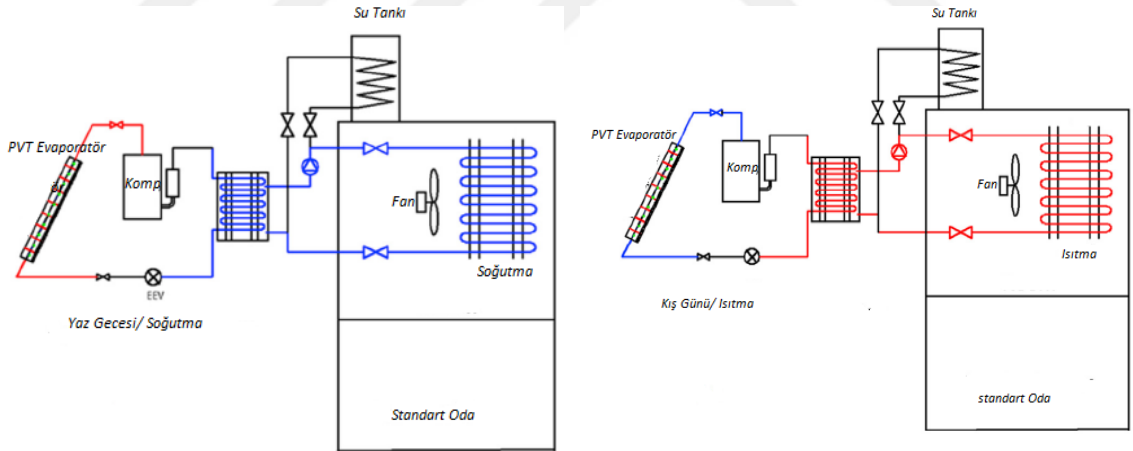
- *Isı borulu PVT sistemler,*

Su ve hava ile soğutulan PVT sistemlerde ortaya çıkan olumsuzluklar, özellikle soğutucu akışkan sızıntıları gibi sorunlar giderilmiştir. Bu amaçla, son yıllarda ısı borulu PVT sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, olumsuzlukların üstesinden gelmek ve PVT teknolojisinin daha güvenilir ve etkili hale getirilmesini sağlamak için önemli bir adımı temsil etmektedir.

1.2.3. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri

Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, güneş enerjisi ve elektrikli ısı pompalarının bir araya geldiği hibrit sistemlerdir. Bu sistemlerde, güneş enerjisi termal kolektörler aracılığıyla ısı enerjisine dönüştürülürken, fotovoltaik paneller elektrik enerjisi sağlar. Güneş enerjisi kolektörleri, ısı pompalarıyla eşzamanlı veya ardışık olarak kullanılabilir.

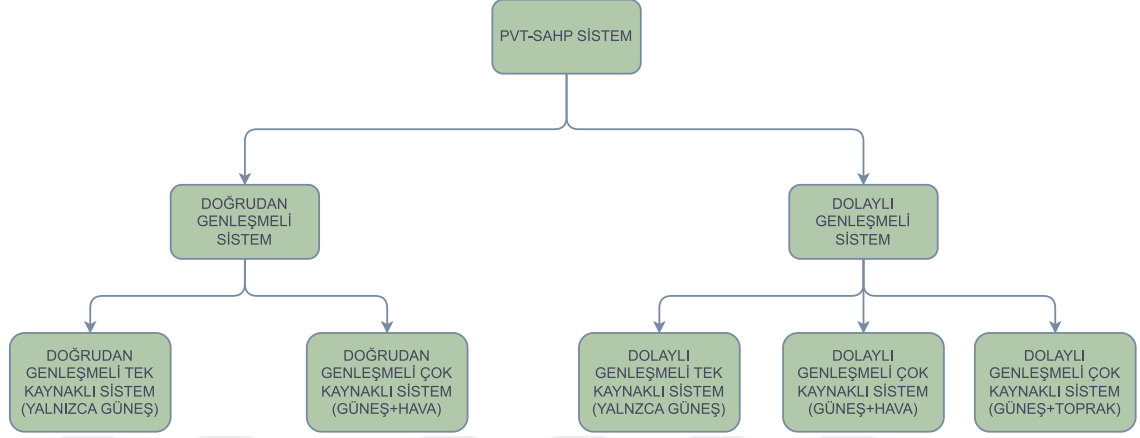
Paralel sistemlerde, güneş kolektörü ve ısı pompası doğrudan veya depo üzerinden yükleri ısıtırken, seri sistemlerde güneş kolektöründen gelen ısı, ısı pompası için dolaylı olarak bir ısı kaynağı olarak kullanılır. Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, temel olarak beş ana kategori altında incelenebilir. Bu kategoriler şunlardır: geleneksel güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, direkt genleşmeli güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, PVT destekli ısı pompası sistemleri, güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı hibrit ısı pompası sistemleri ve diğer güneş enerjisi destekli hibrit ısı pompası sistemleridir. (Poppi, 2017). Şekil 1.16’da PVT evaporatörlü ısı pompası sisteminin şematik resmi sunulmuştur.



Şekil 1.16. PVT evaporatörlü ısı pompası bütünsel sistemi (Bisengimana ve diğ., 2022)

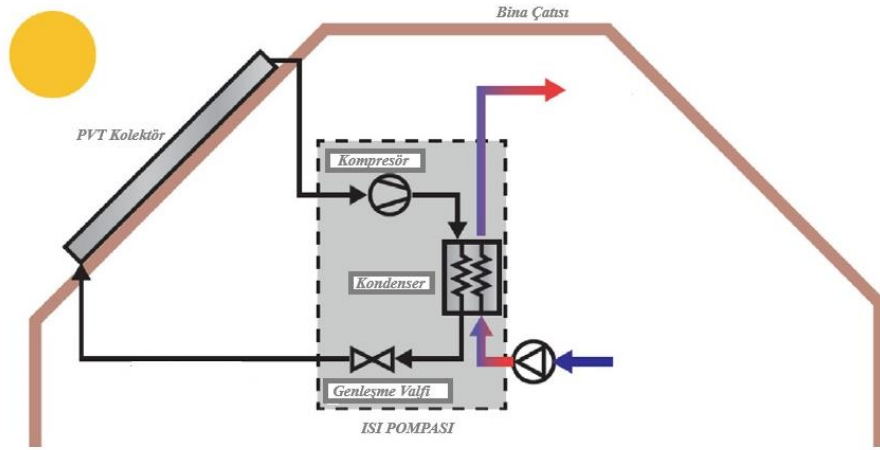
Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri hem ısı pompası hem de güneş kolektörlerinin işlevlerini birleştirerek çalışan sistemlerdir. Şekil 1.17’de bu sistemlerin kavramsal şeması sunulmuştur. Bu sistemde, ısı transferi aracı olarak bir ısı değiştirici kullanılır. Isı pompası çevriminde kompresör, genleşme valfi, ara ısı değiştirici ve kondenser gibi temel bileşenler bulunur. Güneş kolektörü çevriminde ise güneş kolektörü, ara ısı değiştirici ve sirkülasyon pompası gibi malzemeler kullanılır. Güneş kolektörü

çevriminde, ısı kolektörden ara ısı değiştiriciye aktarılırken, ısı pompası çevriminde ise soğutucu akışkan buharlaşma ile ikincil akışkandan ısı çeker ve buharlaşma sonrası kondenserdeki ısıyı dışarı atar. (Şensoy, 2019).

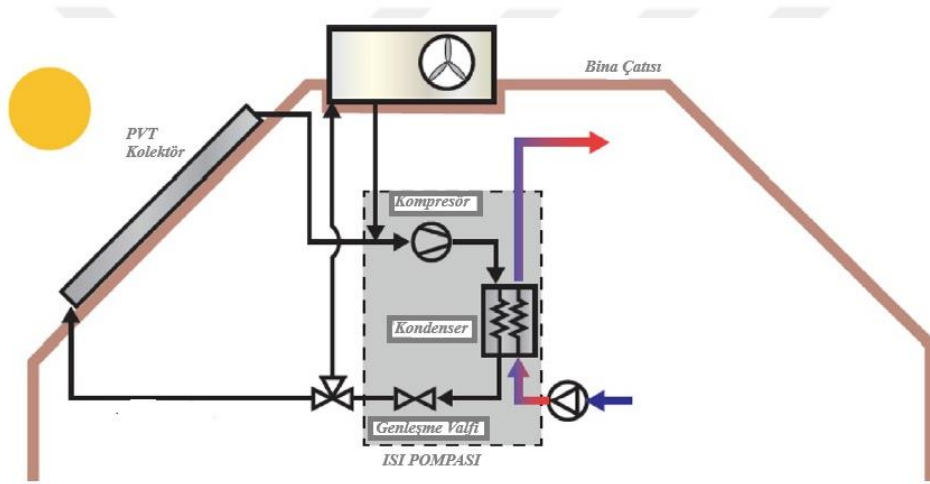


Şekil 1.17. Fotovoltaik-Termal Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Kavramsal Şeması (Miglioli ve diğ., 2023)

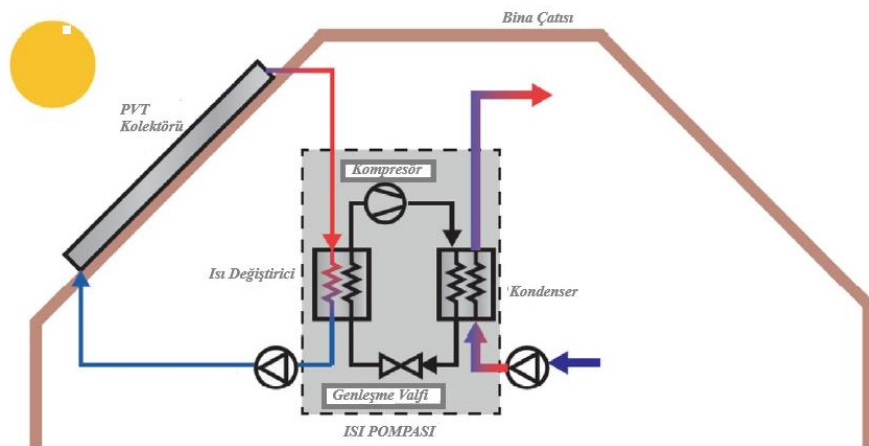
Geleneksel güneş paneli teknolojilerinin verimliliği sınırlıdır ve ekonomik yatırımların gerekliliği, bu sistemlerin alan ısıtma pazarında rekabet edememesine neden olmaktadır. Yüksek ısı transferi verimliliği ve düşük maliyet sağlaması açısından doğrudan genleşme ile çalışan güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemde, geleneksel sistemlerde ayrı olarak kullanılan güneş kolektörleri ve ısı pompası çevrimleri bütünleşik hale getirilmiştir. Bu sayede soğutucu akışkan doğrudan güneş enerjisi kolektörlerinden ısı almaktadır. Bu tür sistemlerde, doğrudan soğutucu akışkan kullanılması nedeniyle sistem korozyon direnci oldukça yüksektir. Bu durum sistemin ömrünü arttırmaktadır. Bu sistemlerde güneş kolektörleri doğrudan ısı pompası devresine entegre olduğu için sistem performansı ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, rüzgâr ve nem gibi doğal koşullardan etkilenmektedir (Tagliafico, 2014). Dolaylı genleşme prensibiyle çalışan güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemlerinde, bağımsız bir güneş kolektörü birimi ve bir ısı pompası birimi bulunur. Güneş kolektörü, güneş ışınlarını su veya hava yoluyla yakalar ve bir ara ısı değiştirici vasıtasıyla elde edilen ısıyı ısı pompasına aktarır. Çift kaynaklı genleşme sistemleri ise PVT ile paralel veya seri olarak hava veya toprak gibi ikinci bir ısı kaynağından yararlanır. Şekil 1-18-21’de doğrudan ve dolaylı genleşmeli sistem örnekleri verilmiştir.



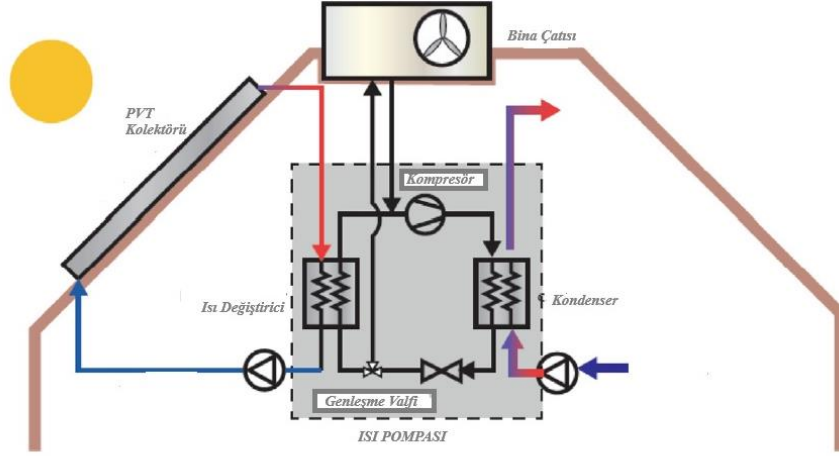
Şekil 1.18. Tek kaynaklı doğrudan genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi (Miglioli ve diğ., 2023)



Şekil 1.19. Çok kaynaklı doğrudan genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi (Miglioli ve diğ., 2023)



Şekil 1.20. Tek kaynaklı dolaylı genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi (Miglioli ve diğ., 2023)



Şekil 1.21. Çok kaynaklı dolaylı genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi (Miglioli ve diğ., 2023)

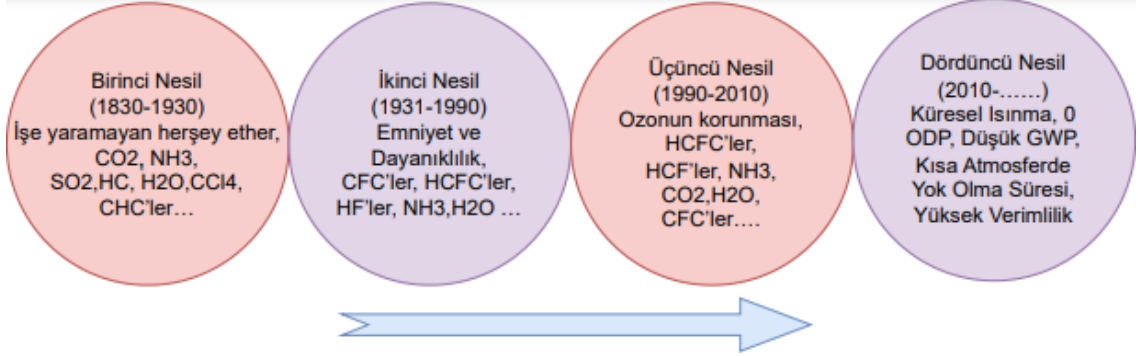
1.3. Soğutucu Akışkanlar

Soğutucu akışkanlar, klima sistemleri ve ısı pompalarında kullanılan aracı (çalışma) akışkanlardır. Düşük kaynama sıcaklıklı akışkanlar olarak bilinir, örneğin R404A soğutucu akışkanı 1 atm basınçta yaklaşık $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kaynar. Isı pompası çevriminde genellikle sıvıdan gaz, gazdan sıvı fazına geçen bir faz değişikliği süreciyle çalışırlar. Sıcaklık ve basınca bağlı olarak farklı hallerde bulunabilirler; sadece sıvı, sadece gaz veya her ikisinin karışımı olabilirler. Bu akışkanlar, düşük sıcaklık ve basınçta ısıyı emer ve daha sonra hâl değişikliği veya basınç artışıyla daha yüksek sıcaklık ve basınçta ısı verirler.

Soğutucu akışkanlar, klima ve dondurucular gibi soğutma sistemlerinde ve ısı pompalarında kullanılır. Isı pompaları, dışarıdan ısı enerjisi alıp bir odaya bırakmak için soğutucu akışkanları kullanır. Aynı akışkanlar, farklı termodinamik çevrimler uygulayan buhar türbinleri gibi diğer uygulamalarda da kullanılabilir ve akışkanın özelliklerine bağlı olarak soğutucu özelliğini koruyabilir veya kaybedebilir.

Ozon tabakasını tahrip eden eski nesil soğutucu akışkanların etkileri anlaşıldıktan sonra, uluslararası protokollerle bu gazların üretimi ve kullanımı düzenlenmiş ve yasaklanmıştır. Ozon tabakasının korunması çabaları, Montreal Protokolü'nün 1997 yılında 43 ülkenin katılımıyla imzalanmasıyla başlamıştır. Bu önlemler sayesinde, ozonu tahrip eden CFC ve HCFC içeren soğutucu akışkanlar yerine, ozon tabakasına zarar vermeyen HFC içeren soğutucu akışkanlar üretimine geçilmiştir. Son zamanlarda R404A,

R407c ve R410A soğutucu akışkanları geliştirilerek uygulaması devam etmektedir. Şekil 1.22’de geçmişten günümüze soğutucu akışkanların gelişimi sunulmuştur.



Şekil 1.22. Geçmişten günümüze soğutucu akışkanlar (Calm, 2008)

Soğutucu akışkanların aşağıda verilen bazı özelliklere sahip olması beklenmektedir;

- Düşük yoğunlaşma basıncı ve etkili buharlaşma yeteneği gereklidir.
- Yüksek buharlaşma gizli ısısı olmalıdır.
- Kimyasal olarak reaktif değil, tesisat malzemelerini etkilememeli ve aşındırmamalıdır, ayrıca yağlama özelliklerini bozmamalıdır.
- Patlayıcı, yanıcı veya zehirli olmamalıdır.
- Sızıntı veya kaçak durumlarını kolayca tespit edilebilmelidir (örneğin, kokusu veya renk değişikliği ile).
- Maliyet açısından uygun olmalıdır.
- İyi bir ısı iletim özelliğine sahip olmalıdır.
- Dielektrik bir özelliğe sahip olmalıdır (elektriksel yalıtım sağlamalıdır).
- Düşük donma noktasına sahip olmalı ve yüksek kritik sıcaklığa dayanıklı olmalıdır.
- Özgül hacmi düşük olmalıdır.
- Düşük viskoziteye sahip olmalıdır.

1.3.1. Soğutucu akışkanların sınıflandırılması

1.3.1.1. İnorganikler ve hidrokarbonlar

İnorganikler ve hidrokarbonlar içinde, amonyak (R717), karbondioksit (R744), su ve hidrokarbonlar (HC) gibi akışkanlar bulunur. Bu akışkanlar sıfır ODP (Ozon Tabakasına Zarar Potansiyeli), düşük GWP (Küresel Isınma Potansiyeli) ve düşük toksik özelliklere sahiptirler, bu nedenle doğal soğutucu akışkanlar olarak bilinirler.

1.3.1.2. Halokarbonlar

Bu tür soğutucu akışkanlar grubunda CFC'ler (kloroflorokarbonlar), HCFC'ler (hidrokloroflorokarbonlar) ve HFC'ler (hidroflorokarbonlar) gibi çeşitli soğutucu akışkanlar yer almaktadır.

1.3.1.3. Hidrofloroolefinler

Hidrofloroolefinler (HFO'lar), karbon, hidrojen ve flor elementlerini içeren, doymamış organik moleküllerdir. HFO'lar, dördüncü nesil bir tür flor bazlı gazları temsil eder.

1.3.2. Soğutucu akışkan karışımları

Soğutucu akışkan karışımları, farklı soğutucu akışkanların belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan soğutucu maddelerdir. Bu karışımlar, istenmeyen özellikleri minimize ederek veya istenen özellikleri optimize ederek soğutma işlemi için kullanılırlar. Bu şekilde soğutucu akışkanların performansı veya özellikleri belirli gereksinimlere göre ayarlanmış olur.

1.3.2.1. Zeotropik karışımlar

Sabit basınçta faz değişimi sırasında sıcaklığı değişen soğutkanlardır. Yoğuşma sıcaklığı hem basıncın hem de karışım oranına göre farklılık göstermektedir.

1.3.2.2. Azeotropik karışımlar

Faz değişimi sırasında sıcaklığı değişmeyen, saf soğutucu akışkan gibi davranan karışımlardır. Azeotrope karışımlar, saf bileşenlerin belirli bir basınç ve sıcaklıkta özgün bir bileşimde ve kaynama noktasında karıştığı karışımlardır. Bu, saf bileşenlerin kaynama noktalarından farklı bir kaynama noktasına sahip olan özel karışımlardır.

1.3.3. R404A

R404A gazı, R125, R134a ve R143a'dan oluşan zeotropik bir karışımdır. Çizelge 1.4'te özellikleri sunulmuştur. Küresel ısıtma potansiyeli (GWP) düşük ve ozon tabakasına zarar verme etkisi (ODP) olmayan bir soğutucu akışkandır. Aynı zamanda, yüksek ısı transfer özellikleri ve en yüksek yoğunlaştırıcı ısı kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, ozon dostu bir alternatif olarak tercih edilmektedir ve soğutma sistemlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle ticari soğutucular ve dondurucularda kullanılır.

Çizelge 1.4. R404A Özellikleri (Anonim-4)

Ortalama Moleküler Ağırlık (g/mol)	97.6
Normal (1 atm) Kaynama Noktası (°C)	46.38
Kritik Isı (°C)	72
ASHRAE Güvenlik Grubu Sınıfı	A1
Ozon İnceltme Potansiyeli (ODP)	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	3200

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışması çerçevesinde, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri hakkında yapılan çalışmaların kaynak araştırması gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen çalışmalar tezin bu bölümünde yıllara göre sıralanarak özetlenmiştir. İlgili çalışmalarda kurulan sistemlerin çalışma prensibi, sistem tasarlanırken kullanılan yöntem ve elde edilen performans değerleri incelenmiştir.

Kaygusuz (1995) güneş destekli ısı pompası ile ilgili Trabzon'da ısııl enerji depolamalı güneş destekli ısı pompalarının performansını analiz etmiştir. Yaptığı deneysel çalışmada, ısıtma sezonu boyunca COP ısıtma değerinin ortalama değerini, sistemler tarafından karşılanan ısı yükünün yüzdesini, paralel ve seri ısı pompası sistemlerinin ortalama kolektör ve depolama verimlerini hesaplamıştır. Çift kaynaklı ısı pompası tasarımını yapmıştır ve bunu paralel mod olarak adlandırmıştır. Ancak sistemin tek ilgisi ısıtma işlemidir. Paralel modda, güneş ışını kolektörü mümkün olduğunda doğrudan ısıtma sağlar ve hava kaynaklı ısı pompası, güneş ışını kolektörüne güneşlenme seviyeleri düşük olduğunda yardımcı olur. Kaygusuz'un çalışması, bir laboratuvar binasının güneş kolektör alanını değiştiren farklı sistemlerle kış ısıtmasını ele almıştır.

Morrison ve diğ. (2004), kondenserin su tankının dışına ve içine yerleştirildiği hava kaynaklı ısı pompası kullanılarak sıcak su elde eden iki farklı sistemi tasarlamış ve yıllık performanslarını test etmiştir. Yaptıkları çalışma, test ettikleri iki farklı hava kaynaklı ısıtma pompalı su ısıtma sisteminin tipik güneş enerjisi su ısıtma sistemlerine veya GDIP (güneş enerjisi destekli ısı pompası) su ısıtma sistemlerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük performans gösterdiğini göstermiştir.

Ji ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada, ısı pompasının buharlaştırıcısı olarak görev yapan PVT kolektörü içeren bir ısı pompalı sistemin teorik ve deneysel analizlerini gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda ortalama COP değerinin 3,5 olduğu tespit edilmiş ve ayrıca PVT kolektörün elektriksel verim değerinin, soğutucu akışkanın içinden geçirilmesinin de etkisiyle %12'den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Xu ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada, elektrik üretimi, hacim ısıtma ve kullanım için sıcak su elde etmeyi amaçlayan bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistemde, soğutucu

akışkanın buharlaşmasını sağlayan buharlaştırıcı bölümünde PVT kolektörü kullanılmıştır. Yapılan analizler, geleneksel ve modifiye edilmiş ısı pompalı PVT sistemlerinin aynı koşullar altında karşılaştırıldığı sonuçları göstermiştir. Modifiye edilmiş PVT kolektörün kullanıldığı sistemlerin COP değerinin %7, termal veriminin %6 ve elektriksel veriminin %2 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Hepbaşlı ve Kalıncı (2009), ısı pompası su ısıtma sistemleri (HPWH) üzerine bir inceleme yapmışlardır. Bu çalışma, HPWH'lar hakkında yapılan çalışmaları enerji ve ekserji perspektifinden ele almıştır. İlgili çalışmaları sınıflandırarak tablo halinde sunmuşlar ve HPWH'ların performans değerlendirmesi için enerji ve ekserji analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmanın temel amacı, daha önce yapılan analizleri ve sistemlerin kullanımını göz önünde bulundurarak HPWH ile ilgili çalışmaları gözden geçirmek, ekserji temelli HPWH hesaplamalarını içeren matematiksel bir model sunmak ve bu matematiksel modeli açıklayıcı bir örnekle uygulamaktır.

Sarhaddi ve diğ. (2010), bir PVT hava kolektörünün termal ve elektriksel performansını incelemiştir. Bilgisayar simülasyonları ve deneysel ölçümlerle modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, PVT hava kolektörünün termal ve elektriksel verimliliklerini artırdığını ve genel enerji verimliliğini %45'e ulaştırdığını göstermiştir. Ayrıca, örnek iklimsel, işletme ve tasarım parametreleri için PVT hava kolektörünün termal verimliliği, elektriksel verimliliği ve genel enerji verimliliğinin sırasıyla yaklaşık %17,18 , %10,01 ve %45 olduğu bulunmuştur. Parametrik çalışmalarla kolektörün tasarım ve iklim parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Chen ve diğ. (2011), yapmış oldukları çalışmalarında ısı pompalı PVT sisteminin deneysel incelemesini yapmıştır. Bu sistem, elektrik üretmek ve sıcak su üretmek için tasarlanmıştır. Eğer yoğunlaştırıcı su debisi 2 L/d ve yoğunlaştırıcıya tedarik edilen su sıcaklığı 35°C ise, ısıtım miktarının 200 W/m²'den 800 W/m²'ye yükseltilmesi, ısı pompası sisteminin ısıtma için COP değerini 2,9'dan 4,6'ya yükseltmiştir. Aynı zamanda ısıtım oranının artırılması, PV tarafından üretilen elektrik gücünü ve PV elektriksel verimini artırmıştır.

Byrne ve diğ. (2012), ısı pompalarının eşzamanlı ısıtma ve soğutma (HPS) uygulamasını küçük ofisler ve konutlarda incelemiştir. Bu sistem, binanın termal

ihtiyaçlarına göre çalışarak ısıtma, soğutma ve sıcak su üretimini sağlamıştır. Isıtma modunda, soğutucu akışkanın aşırı soğutulmasıyla enerji üreten bir su deposu ve bir su soğutucusu kondenser sonrasına entegre edilmiştir. Ardından, ortam havasından daha yüksek sıcaklıktaki suyu kullanarak bir buharlaştırıcı için kaynak olarak hizmet vermiştir. Bu sistem, standart ısı pompalarına kıyasla daha yüksek bir ortalama kış performansı sunmuştur. Hava buharlaştırıcısı, ısı üretimini kesmeden iki fazlı bir termosifonla çözülmüştür. HPS sistemi, TRNSYS programı kullanılarak modellenmiş ve sonuçlar standart bir ısı pompası ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, elektrik enerjisi tüketiminde %55'e varan tasarruf ve yıllık performans artışının %19'a kadar ulaşabileceği gösterilmiştir.

Al-Zahrani ve diğ. (2012) bir simülasyon çalışması gerçekleştirerek ısı pompalarının tropikal iklimlerde bir ev veya ofis binasının ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için sıcak su ve soğuk su depolama sistemlerine nasıl entegre edilebileceğini incelemişlerdir. Bu çalışmanın ana amacı, ısı pompası tarafından kullanılmayan atık ısının etkin bir şekilde değerlendirilmesidir. Bu sistemde, ısı pompası iki su depolama tankıyla bütünleştirilmiştir. İlk tank, ısı pompası tarafından üretilen fazla ısıyı depolamak için kullanılan sıcak su deposudur. İkinci tank ise soğutma suyu sağlamak amacıyla kullanılan soğuk su deposudur. Soğuk su deposundan gelen su, ev veya ofis binasının soğutma ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Sıcak su deposu ise günlük kullanım için sıcak su sağlamış, örneğin banyo yapma veya bulaşık yıkama gibi işlemler için kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, iki depolama tankının boyutlandırılmasının ve bu iki tank arasındaki ısı transferinin dengelenmesinin, depolama tanklarında uygun sıcaklıkların korunması açısından kritik tasarım faktörleri olduğunu vurgulamıştır.

Kim ve Kim (2012), sıvı soğutmalı PVT panelin elektriksel veriminin, paneli soğutma amacıyla kullanılan akışkanın sıcaklığına bağlı olduğunu ve akışkan sıcaklığının artmasıyla PVT panelin elektriksel veriminin azaldığını deneysel bir çalışma yaparak göstermişlerdir. Onlara göre, PVT ve PV modülü arasındaki elektriksel verim farkı maksimum %2,4 olup, toplam ortalama fark %1,7'ye ulaşmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada, aynı test koşulları altında PVT modülün PV modülünden daha iyi elektriksel performansa sahip olduğunu ve bu performansın tamamen ıslak soğurucu kullanılarak artırılabilceğini buldular.

Sterling ve Collins (2012), dolaylı tip güneş enerjisi destekli ısı pompası (I-GDIP) ile çalışan ev tipi sıcak su sistemlerinin fizibilite analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizi yapabilmek için bir I-GDIP ev tipi sıcak su sistemi modellemiş ve bu modeli TRNSYS programı aracılığıyla uygulamışlardır. Daha sonra bu I-GDIP sistemi, geleneksel bir güneş enerjili evsel sıcak su sistemi ve elektrikle çalışan bir evsel sıcak su sistemi ile karşılaştırmışlardır. Tüm bu sistemlerin kullanım amacı sadece evde su ısıtmaktır. Çalışma sonuçları, teorik olarak bir ısı pompasının ev tipi bir su ısıtıcısının performansını artırabileceğini göstermektedir. I-GDIP sistemi, diğer iki sisteme göre daha az elektrik enerjisi tüketmiş ve daha fazla güneş enerjisi toplamıştır. Bu nedenle Sterling ve Collins, I-GDIP sistemi ile elektrik tüketiminin ve işletme maliyetlerinin en az olduğu sonucuna varmışlardır.

Auzenet ve diğ. (2013), 116 m²'lik ve yıllık enerji tüketimi 50 kWh/m² yi geçmeyen bir evde, PVT panelleri ve ısı pompasının entegrasyonunu yapmıştır. Panellerden elde edilen ısı enerjisi, ısı pompası evaporatöründe veya yeterince yüksek sıcaklıkta ise evin sıcak su ihtiyacını karşılamada kullanılmıştır. Isı pompasının kondenserinden atılan ısı ise ya evin sıcak su ihtiyacında ya da ayrı bir su deposunda toplanarak evin fan-coil ile ısıtılmasında kullanılmıştır. Havadan suya ısı pompası ve PV panelleri ayrı ayrı kullanıldığı ve suyun depolanmadığı referans duruma göre, PV üretimi %10 artmış, kompresör güç tüketimi %20 azalmıştır.

Bahaidarah ve diğ. (2013), hibrit bir güneş panelli su soğutma sisteminin performansını analiz etmek amacıyla EES (Engineering Equation Solver - Mühendislik Denklem Çözücüsü) kullanarak sayısal bir model oluşturmuştur. Modülü soğutmak için arka yüzeyine bir ısı değiştirici (soğutma paneli) entegre etmenin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Sayısal modelin sonuçları, Suudi Arabistan'ın Dhahran bölgesi için yapılan deneysel ölçümlerle uyumlu bulunmuştur. Aktif su soğutma ile modül sıcaklığı önemli ölçüde düşerek PV panel veriminde %9 artışa yol açmıştır. PV modülün performansının, çalışma sıcaklığına bağlı olduğunu göstermiştir.

Chargui ve Sammouda (2014), bir konutun modellemesini, çift kaynaklı ısı pompası sistemini ve güneş ışıınının konutun çeşitli yönlerine etkisini içeren bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırma, konutun iklimsel etkilere karşı tepkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Isı pompası sisteminde suyun tanktan hızlı bir şekilde ayrılması,

sistemin termal dengesizliğe yol açarak depo sıcaklığının düşmesine, ısı pompasının performansının azalmasına ve elektrik tüketiminin artmasına neden olabilir. Ancak bu dezavantajlara rağmen, bu sistem konut veya sera ısıtması için Tunus ve Akdeniz iklimlerinde tatmin edici bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Banister ve diğ. (2014), ev tipi sıcak su tankı kullanan ve çeşitli işletme seçeneklerine sahip olan güneş enerjisi destekli ısı pompası (SAHP) sisteminin doğrulama çalışması üzerine odaklanmışlardır. Bu doğrulama çalışması, özel olarak tasarlanmış bir test düzeni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek, birkaç farklı GDIP (güneş enerjisi destekli ısı pompası) sistem konfigürasyonunun deneysel olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Deneysel testler sırasında güneş kolektörleri yerine elektrikli bir ısıtıcı kullanılmıştır. Belirli günler için test düzeneklerinin sonuçları kaydedilmiş ve ardından TRNSYS modeli ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, sıcak su tankındaki ortalama sıcaklık farklarının 1 dereceden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Li ve diğ. (2014) çalışmalarında, soğuk iklim koşullarında mahal ısıtma ve evde kullanılan sıcak su sağlamak için mevsimlik enerji depolamasını kullanarak bir güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi önermiştir. Bu sistem dört farklı modda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Mod 1, güneş enerjisi depolama için, mod 2, güneşle doğrudan ısıtma için, mod 3, sudan suya ısı pompası ile ısıtma için ve son olarak mod 4, havadan suya ısı pompası ile ısıtma için olmak üzere ayrılmıştır. Sistem, toplam inşaat alanı 2252 m² olan ve 20 odaya sahip 6 katlı bir yurt binası için tasarlanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, sistemin ortalama ısıtma için COP değeri ısıtma ayları boyunca 3,7'ye ulaşmıştır. Mahal ısıtma için aylık ortalama COP yaklaşık olarak 3,2'dir. Sistem, geleneksel mahal ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık %52 enerji tasarrufu sağlamıştır. Ayrıca, en önemli tasarım parametrelerinin depolama tankı karakteristiği, havadan suya ısı pompasının ölü bant sıcaklığı ve güneş kolektörü alanı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, havadan suya ısı pompasının ölü bant sıcaklığının -7, optimum depolama faktörünün 0,5 m³/m² ile 0,8 m³/m² arasında ve güneş kolektörü alanının 130 m² ile 160 m² arasında olması önerilmiştir.

Carbonell ve diğ. (2014) mahal ısıtması ve sıcak kullanım suyu hazırlanmasında güneş enerjisi destekli ısı pompalarının potansiyel faydalarını incelemişlerdir. Bu

çalışmada, güneş ısı sistemlerinin ısı pompaları ile birleştirilmesinin sayısal analizi yapılmıştır. Tüm simülasyonlar Polysun-6® programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem hava kaynaklı ısı pompası hem de toprak kaynaklı ısı pompası için bir güneş enerjisi termal sistemi eklemekle, toplam ısıtma sisteminin mevsimsel performans faktörünün arttığını göstermektedir. Ayrıca, hava kaynaklı ısı pompasının performansının bir güneş enerjisi termal sistemi ile birleştirildiğinde azaldığı belirtilmiştir. Ancak, mutlak elektrik tasarrufu açısından, bir ısı pompası sisteminin güneş enerjisi ile desteklenmesinin faydası, güneş enerjisi sistemi olmayan referans sistemin elektrik enerjisi tüketimi ile karşılaştırıldığında hava kaynaklı sistemlerin yüksek bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yüksek enerji talebi olan sistemlerin, örneğin daha soğuk iklimlerde veya daha düşük bina izolasyon standartlarına sahip sistemlerde, düşük enerji talebi olan sistemlere göre daha fazla fayda sağlayacağı vurgulanmıştır.

Kamel ve Fung (2014), çatıda bulunan fotovoltaik-termal hibrit (PVT) güneş kolektörleri ile hava kaynaklı ısı pompasının (ASHP) bir evdeki işleyişini incelemek için TRNSYS aracılığıyla bir model geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen sistemde, ısı pompası kaynak olarak PVT kolektörünün ürettiği sıcak havayı kullanmıştır. Sistem, farklı mevsimlerdeki ısı pompasının performansını gözlemlemek için bir dizi bölgede simüle edilmiştir. Bu hibrit sistem sayesinde elektrik maliyetlerinde tasarruf sağlanmış ve sera gazı emisyonları azaltılmıştır. Ayrıca, PV paneller tarafından üretilen fazla elektrik yerel bir şebekeye satılarak gelir elde edilmiştir. Elektrik maliyet analizi, Toronto Hydro'daki konut elektrik ücretleri ve Toronto bölgesi simülasyon verileri kullanılarak yapılmıştır. Sistem, ısıtma amacıyla PVT kolektör ve hava kaynaklı ısı pompasının kullanımıyla ortalama aylık 24 \$ tasarruf sağlamıştır. Aynı zamanda, sistem sayesinde şebeke elektriği tüketiminden kaynaklanan sera gazı (CO₂) emisyonları 225 kg azalmıştır. Yaz sezonunda PVT kolektörler aşırı elektrik üretmiş ve bu fazla elektrik şebekeye satılmışken, kış sezonunda sistemin kendi ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Sobhnamayan ve diğ. (2014), ekserji kavramına dayalı bir PVT su kolektörünün optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. PVT kolektörünün termal ve elektriksel parametreleri analitik olarak elde etmek için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Daha sonra bilgisayar simülasyonları kullanılarak kolektörün ekserji verimliliği optimize edilmiştir. Optimum giriş suyu hızı 0.09 m/s ve boru çapı, 4.8 mm olarak belirlenmiş ve

maksimum ekserji verimliliği elde edilmiştir (%11.36). Ayrıca, iklim parametrelerinin ekserji verimliliği üzerindeki etkisi parametrik çalışmalarla incelenmiştir.

Wang ve diğ. (2015), çift ısı kaynaklı kompozit buharlaştırıcıya sahip bir ısı pompalı-PVT sisteminin deneysel ve teorik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemi üç ana bölüme ayırmışlardır: ısı pompası, PVT ve sıcak su sistemi, ısı pompası sistemi, soğutkanın kompresöre girdiği bölümü içerir. Bu aşamada, düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutkan, kompresör tarafından yüksek basınç ve sıcaklığa çıkarılır. Ardından, yoğunlaştırucuya yönlendirilen soğutkan, ısıyı kullanım suyuna vererek yoğunlaşır. Yoğunlaştırucudan çıkan soğutkan, kısılma vanasına girer, burada yüksek basınçtan düşük basınca geçer ve sıvı-buhar karışımı haline gelir. Bu aşamadan sonra soğutkan kompozit buharlaştırıcıya yönlendirilir, burada çevre hava ve PVT'lerden gelen ısınmış su ile ısı alışverişi yaparak buharlaşır. Daha sonra tekrar kompresöre dönerek ısı pompası sisteminin çevrimini tamamlar. Yapılan deneysel çalışmalar, sistemin anlık COP değerinin 2,0 ile 2,6 arasında değiştiğini ve ortalama olarak 2,5 olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, sistemin göreceli olarak iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.

Emmi ve diğ. (2016), PVT solar kolektör teknolojisi ile ortam ısıtması ve sıcak su ihtiyacı için çok kaynaklı ısı pompasını araştırmışlardır. Isı pompasında, hava, su ve toprak kaynakları incelenmiştir. İtalya'nın kuzey doğusunda bir aile evinin ihtiyaçları düşünülmüştür. Standart havadan suya ısı pompasına göre enerji verimi çok kaynaklı ısı pompasında %14 ile %26 arasında artış olabileceği bulunmuştur. Hava ve güneş kaynaklı sistemin enerji verimi 3.64 bulunmuş olup daha karmaşık sistemlerden hafifçe düşüktür.

Shan ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, pasif güneş alanı, aktif termal su ısıtma sistemi ve hava kaynaklı ısı pompasını içeren bütünleşmiş bir mahal ısıtma sistemi inşa edilmiştir. Bu çalışmada, her alt sistemin performansı detaylı bir şekilde analiz edilerek, soğuk iklim koşullarına sahip tam ölçekli bir test evinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, bu entegre sistemin, kış mevsimi koşullarında istikrarlı ve konforlu bir iç mekân sıcaklığı sağladığını göstermiştir. Hava kaynaklı ısı pompasının elektrik tüketiminin, evin ısı ihtiyacının yaklaşık üçte birini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca, enerji tasarrufu sağlamak için hava kaynaklı ısı pompasının çalışma aralığının, düşük dış sıcaklık saatleri yerine yüksek dış sıcaklık saatleri ile sınırlanması gerektiği tespit edilmiştir. Bu şekilde ortalama COP değerinin,

tipik soğuk iklim koşullarında %20'nin üzerinde iyileştirilebileceği gözlenmiştir. Bu çalışma, özellikle kırsal binalarda enerji tasarrufu sağlama ve emisyonları azaltma potansiyeli taşıyan gelecek vadeden bir teknoloji olarak bu tür sistemlerin kullanılabileceğini göstermektedir.

Li ve diğ. (2017), güneş enerjisi kolektörleri ile ev tipi sıcak su sistemlerinde hava kaynaklı ısı pompalarının kullanımının iklim koşullarına bağlı olarak nasıl değişebileceğini incelemişlerdir. Bu çalışma için TRNSYS simülasyon programını kullanmışlardır. Tayvan'ın Tainan şehrinde gerçekleştirilen bir test düzenekleri ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini kontrol etmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, farklı sistem seçeneklerini değerlendirmek ve iklim koşullarının etkilerini incelemektir. İncelenen sistem seçenekleri arasında geleneksel elektrikli su ısıtma sistemi, güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompası sistemi (GDHKIP), tek tanklı güneş enerjili sistem ve çift tanklı GDHKIP sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler Taipei ve Kaohsiung gibi farklı iklim bölgelerinde simüle edilmiştir. Sonuçlar, çift tanklı GDHKIP sisteminin elektrik tüketimini en düşük seviyede gerçekleştirdiğini ve en düşük işletme maliyetlerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tek tanklı sistemlerin geri ödeme süresinin çift tanklı sistemden daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Ancak ekonomik olarak en uygun seçeneğin, teknik olarak en uygun seçenikle çeliştiği belirtilmiştir. Bu çalışma, güneş enerjisi destekli ısı pompaları ile ilgilenen araştırmacılar ve uygulayıcılar için farklı iklim koşullarında en iyi uygulamaları belirleme konusunda önemli bilgiler sunmaktadır.

Do ve diğ. (2017), çalışmalarında hibrit kolektöre sahip güneş enerjili ısı pompası (SAHP) sisteminin termodinamik modellemesini yapmışlardır. Bu çalışma, çevresel verileri IWEA (Uluslararası Hava Durumu Enerji Hesaplamaları) standardından temin edilen ASHRAE tarafından sağlanan verilerle gerçekleştirilmiştir. Sistemde hibrit kolektör kullanılmıştır, bu kolektör standart güneş kolektörü ile ısı değiştiriciyi içermektedir. Bu tasarım, güneş ışıının yetersiz olduğu durumlarda dış ortam sıcaklığını kullanarak ısı pompasının verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Elektrik tüketimi hesaplamalarında sistemi destekleyen fanlar ve dolaşım pompaları gibi yardımcı bileşenler de dikkate alınmıştır. Bu modelin geliştirilmesiyle, sistemdeki ısı transfer hızı, ısı pompası performans katsayısı (COP) ve sistemin yıllık çalışma süresi gibi faktörler değerlendirilmiştir. Hibrit kolektörün kullanımı ve dolaşım pompaları gibi yardımcı bileşenlerin elektrik tüketimi göz önüne alındığında, sistemin performansı daha detaylı

bir şekilde analiz edilmiştir. Bu tür çalışmalar, güneş enerjili ısı pompası sistemlerinin etkinliğini artırmak ve tasarım parametrelerini optimize etmek için önemlidir. Hibrit kolektörler, güneş enerjisi kullanımının artırılmasına yardımcı olan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Gang Wang ve diğ. (2017), konut binalarına enerji sağlamak için çok fonksiyonlu bir güneş fotovoltaiik termal (PVT) ısı pompası sistemi tasarlamışlardır. Sistemin kışın ısıtma, yazın soğutma, yıl boyunca kullanım suyu ısıtma ve evlerin elektrik talebinin bir kısmını karşılamak için farklı 7 modu bulunmaktadır. Sonuçlar, PVT kolektörünün ortalama genel verimliliğinin, güneş ışınımı yeterli olduğunda PVT su ısıtma modu için %50'den fazla olduğunu ve dolayısıyla PVT kolektörünün iyi performans gösterdiğini göstermiştir. PVT-WSHP (PV-T ve su kaynaklı ısı pompası tabanlı ısıtma modu) ısıtma modu ve PVTW ve ASHP (PVT ve su ve hava kaynaklı ısı pompası tabanlı ısıtma modu) ısıtma modundaki ortalama ısı toplama verimliliğinin % 37,5 ve % 36,45 olduğunu, ortalama üretim verimliliklerinin % 13,8 ve % 13,55 ve ortalama COP'lerin 3,18 ve 2,53 olduğunu göstermektedir. PVT kolektörünün genel verimliliği, güneş enerjisinde PVT su ısıtma modunda %55,4'e ulaşmaktadır. ASHP soğutma modundaki ve WSHP soğutma modundaki COP'ler sırasıyla 2.46 ve 2.06'dır ve bu da soğutma yükü talebini karşılamaktadır. Bu nedenle, farklı çalışma modları etkinleştirilebilir ve böylelikle mümkün olan maksimum enerji tasarrufu gerçekleştirilebilir. Sistem güneş enerjisini tam olarak kullanabilir ve güneş enerjisi ile ısı pompası arasında avantajlı tamamlayıcılıklar gerçekleştirebilir.

Noro ve Lazzarin (2018), güneş enerjisi kolektörleri ile ısı pompası sistemlerinin birleşimi olan fotovoltaiik-termal (PVT) hibrit güneş enerjisi ve ısı pompası sistemlerini farklı iklim koşullarında enerji ve ekonomik performans açısından incelemişlerdir. Bu hibrit sistem, güneş enerjisi toplamak ve bu enerjiyi ısı üretimi için kullanmak amacıyla fotovoltaiik panelleri ve ısı pompasını bir araya getirir. Yani hem elektrik üretimine hem de ısıtma/soğutma ihtiyacının karşılanmasına katkıda bulunur. Çalışmaları, bu PVT-ısı pompası hibrit teknolojisinin enerji ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla TRNSYS simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu sistem enerji tasarrufu açısından oldukça etkili bir çözüm sunmuş, tasarruf oranları %35 ile %65 arasında değişmiştir. Ayrıca, yatırımın amortisman süresi İtalya'nın güney bölgelerinde yaklaşık 10 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu tür çalışmalar,

güneş enerjisi ve ısı pompalarının bir arada kullanılmasının enerji verimliliği ve ekonomik fayda açısından önemli olabileceğini göstermektedir. İklim koşullarına ve coğrafi konumuna bağlı olarak, bu tür sistemler farklı bölgelerde farklı avantajlar sunabilir.

Wallati ve diğ. (2018), tarafından yapılan sistem performansı üç farklı lokasyon (Krakov, Milano ve Roma) için incelenmiştir. Tesis bir termal fotovoltaik panel, bir ısı depolama tankı, bir su/su ısı pompası ve fan coilden oluşmaktadır. PVT panellerin termal ve elektrik olmak üzere çift üretimi vardır. Elektrik, suyu ısı pompasına aktarmak ve binanın elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Elektrik gücünün fazlası bir depolama sisteminde depolanabilir veya şebekeye gönderilebilir. PVT termal üretimi termal depolama tankında bulunan suyu ısıtmak için kullanılır. Termal depolama, ısı pompasının çalışmasıyla güçlü bir şekilde bağlantılı olduğundan tüm sistemin kritik noktasıdır. Sistemin Roma için 4,95, Milano için 4,96 ve Krakov için 4,82 COP değerinde çalıştığı görülmüştür. Yapılan analiz, ılıman bir iklime sahip şehirler için önerilen sistemin iyi performans gösterdiğini söylemektedir. Roma şehri için karşılanan ısıtma talebi %70, Milano için %62 ve Krakov için %47'dir. Bu değerler, ısı pompası tabanlı PVT ısıtma sistemleri için nispeten iyi bir potansiyel göstermektedir.

Obalanlege ve diğ. (2020), güneş enerjisiyle konutlarda ısıtma ve elektrik sağlamak üzerine hibrit bir PVT ve ısı pompası sisteminin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Bu çalışma, konutlara alan ısıtma ve elektriğin eş zamanlı olarak sağlanması için hibrit fotovoltaik-termal ısı pompası sistemlerine dayanan bir güneş enerjisi kombine ısı ve güç sistemlerini araştırmaktadır. Analiz edilen sistem, PVT paneli, bir PVT su tankını ve ısı pompasını birleştirir. Sistemin performansı üzerinde güneş ışıınının, su tankının boyutunun ve PVT borularındaki su akış hızının etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, ısı pompasının minimum COP değerinin 4,2 olduğunu göstermiştir. Ayrıca PVT panelindeki su akışını laminar akıştan türbülanslı akışa çevirmek, PVT'nin toplam verimliliğini (elektrik + termal) % 61'den % 64,5'e yükseltir. PVT su deposunun boyutunu 1 L'den 100 L'ye çıkarmak, PVT panelinin toplam verimini % 6,5 oranında artırır.

Yao ve diğ. (2020), doğrudan genleşmeli güneş destekli PVT-ısı pompası sistemleri için verim faktörünü teorik olarak türetmiş ve roll-bond panelli doğrudan

genleşmeli PVT modülünün verim faktörünü deneysel olarak doğrulamışlardır. Verim faktörü, sistemlerin termal performansını tasarlamak, değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılabilir. Dört farklı buharlaştırıcı ünite türü için parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve her bir parametre için önerilen değerler sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, altıgen ve dikdörtgen desenli roll-bond buharlaştırıcının daha homojen sıcaklık dağılımına sahip olduğunu ve belirli boyutsuz basınç kayıpları elde ettiğini göstermiştir. Ayrıca, roll-bond buharlaştırıcılar için yeni bir tasarım yöntemi önerilmiş ve PVT modülü için altıgen ve ızgara tiplerinin kombinasyonu önerilmiştir. Önerilen tasarım parametreleri arasında sıvı kanal genişliği ve ölçekleme oranı bulunmaktadır. Sonuç olarak, roll-bond panelli doğrudan genleşmeli PVT modülünün verim faktörünü belirlemek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemlerin termal performansını iyileştirmek ve optimize etmek için tasarım parametreleri sağlamıştır.

Zarei ve diğ. (2020) fotovoltaiik termal kolektörün kullanıldığı birleşik güneş soğutma ve ısıtma sisteminin performansını incelemişlerdir. PVT kolektör, güneş enerjisini elektrik ve termal enerjiye dönüştürme avantajı sağlamaktadır. Çalışmada su ile soğutma yöntemi kullanılarak sistemin verimliliği artırılmıştır. R600a ve R290 gibi düşük global ısınma potansiyeline sahip alternatif soğutucu akışkanlar tercih edilmiştir. Suyun kütle dibisinin artmasıyla sistemin genel verimliliği iyileşmiştir. R290'nin diğer soğutucu akışkanlara göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, panel soğutmanın sistemin performansını artırdığını ve COP değerini yükselttiğini göstermektedir.

Yao ve diğ. (2021), geleneksel hava kaynaklı ısı pompası sistemlerinin düşük ortam sıcaklıklarındaki kusurlarını gidermek için buhar enjeksiyonlu çevrim kullanarak bir sistem geliştirmişlerdir. PVT kolektör/evaporatör, fiziksel yapısı sayesinde yüksek buharlaşma sıcaklıklarına ulaşarak sistem performansını artırmaktadır. Detaylı matematiksel bir model önermiş ve bu modelin etkinliğini doğrulamışlardır. Parametrik çalışmalar yapılmış ve önerilen sistem -10°C dış hava sıcaklığı ve 500 W/m^2 güneş ışınlamı şartlarında 4.0 COP değerine ulaşabilmiştir. Fotovoltaiik panellerin elektriksel verimliliği %15,1, sistem termal verimliliği ise %44,8 olarak hesaplanmıştır. Sistem performansını iyileştirmek amacıyla üç mod içeren bir hibrit kontrol yöntemi önerilmiştir.

Bu sistem, birim ısı maliyetini %51,5 azaltarak elektrikli ısıtma sistemine göre daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır.

Bisengimana ve diğ. (2022), doğrudan genleşmeli güneş destekli PVT-ısı pompası sistemlerinin performansını artırmak için çok kaynaklı bir PVT ısı değiştirici modeli geliştirmiş ve analiz etmişlerdir. Bu model, verim faktörü hesaplamaları ve simülasyon sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Sayısal simülasyonlar, soğutucu akışkan ve kütle debisi, tüp aralığı, kanatlı ısı değiştirici ve diğer faktörlerin etkilerini incelemek için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kanatçıklar ve tüpler arasındaki küçük boşluklu yılan şeklindeki PVT ısı değiştiricisinin daha homojen sıcaklık dağılımı ve yüksek verim faktörü sağladığını göstermiştir. 0.02 kg/s kütle debisi soğutulan ve soğutulmayan PVT buharlaştırıcı ile ortalama PV sıcaklığı sırasıyla 47.81°C ve 71.11 °C 'dir. Kanatlı PVT buharlaştırıcı tarafından 0.02 kg/s kütle debisinde 40.73 °C ortalama PV sıcaklığı elde edilirken, birim izolasyonlu olduğunda 53.95 °C elde edilmiştir. Bu çalışma, doğrudan genleşmeli güneş destekli PVT ısı pompası sistemlerinin tasarımını ve performansını iyileştirmek için önemli bir adım olmuştur.

Lie (2022) tez çalışmasında, PVT modül kullanarak doğrudan genleşmeli fotovoltaik güneş destekli ısı pompası sistemini incelemiştir. Bu sistemde, PVT modül hem elektrik hem de termal enerji üretebilen özel bir modüldür. Bu tez çalışması, Trondheim, Norveç'te bu sistemin kullanılabilirliği, enerji performansı ve ekonomisi üzerine yapılan bir çalışmadır. Çalışmanın enerji sistemi önerisi yapılmış ve MATLAB ortamında bir sayısal simülasyon modeli geliştirilmiştir. Bu modelde, PVT-SAHP sisteminin saatlik, günlük ve yıllık performans değerlendirmeleri yapılmış ve evsel sıcak su ihtiyacı 7°C'den 55-65°C'ye çıkartılarak sabitlemek amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, PVT-SAHP sistemi, Norveç'in soğuk iklim koşullarında bile yüksek verimlilikle çalışabilmektedir. Kışın COP değeri 2.8 ve yazın 5.8'e ulaşarak, düşük sıcaklıklarda bile yüksek verimli bir ısıtma sağlamaktadır. Ayrıca, geleneksel hava kaynaklı ısı pompası ve elektrikli ısıtma sistemlerine kıyasla, PVT-SAHP sistemi daha iyi bir yıllık enerji performansı ve daha düşük bina net yıllık elektrik tüketimi sunmaktadır. Bu durum, yıllık enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu çalışma, doğrudan genleşmeli fotovoltaik güneş destekli ısı pompası sisteminin Trondheim şehrinde etkili bir şekilde çalışabileceğini ve enerji performansı ve ekonomi açısından geleneksel ısıtma sistemlerine göre avantajlı olduğunu göstermektedir.

Zarei ve diğ. (2022-a), PVT kolektör kullanarak güneş enerjisinin maksimum verimle kullanılmasına odaklanmış ve yaz aylarında tropikal bölgelerde ejektör-sıkıştırma soğutma çevrimi kullanarak birleşik güneş soğutma/ısıtma sisteminin performansını incelemeyi amaçlamışlardır. PVT'nin kullanılmasının başlıca avantajı, güneş enerjisinin maksimum miktarda elektrik ve termal enerjiye dönüştürülmesidir. Bu amaçla su, panelin soğutulması ve dolayısıyla verimliliğin artırılması için kullanılmıştır. Soğutma çevrimi, iki farklı buharlaşma sıcaklığına sahip hibrit bir ejektör-sıkıştırma soğutma döngüsünü içermektedir. Ayrıca, küresel ısınma etkilerini azaltmak için R134a yerine daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip R600a ve R290 gibi çevre dostu soğutucular kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, 945 W/m^2 güneş yoğunluğunda su kütle debisinin 0.011 kg/s 'den 0.03 kg/s 'a çıkarılmasıyla, PVT sisteminin genel verimini %66.7'den %75.8'e çıktığını ve R290'nin en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Bu optimize edilmiş sistem, güneş enerjisinin daha verimli kullanılmasına ve daha düşük çevresel etkilere yol açmaktadır.

Zarei ve diğ. (2022-b), fotovoltaiik termal (PVT) ve düz plaka kolektör (FPC) sistemlerini birleştirmiş ve analiz etmişlerdir. Sistemin termodinamik ve ekonomik performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. PVT ve FPC kolektörlerinin seri konfigürasyonda kullanılmasıyla maksimum elektrik ve termal verimlilik hedeflenmiştir. Sistem performansı üzerinde kompresörün etkisi araştırılmış ve sistemin performansında önemli ölçüde artış elde edildiği görülmüştür. Booster kompresör kullanmanın sistem performansını önemli ölçüde artırdığını, performans katsayısında %96.34, ekserji verimliliğinde %55.1 ve net çıkış gücünde %121.9 artış sağladığını göstermektedir. Bu optimum sistem ayrıca 2504 kg karbondioksit salınımını önlemektedir. Sonuçlar, enerji ve ekserji verimliliği, geri ödeme süresi ve iç getiri oranı gibi kriterler açısından olumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Ağ (2023) tez çalışmasında çevreci bir yaklaşım ile evin ısıtma ve elektrik ihtiyacının karşılanması için PVT entegreli CO_2 ile çalışan bir ısı pompası sistemi incelemiştir. Bu sistemde, PVT panellerin güneş enerjisini elektrik ve termal enerjiye dönüştürmesi ve bu enerjinin ısı pompasıyla evin ısınma ihtiyacını karşılamada kullanılması hedeflemiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, evin ısıtma enerjisi ihtiyacı belirlenmiştir. Daha sonra, PVT panellerin modellenmesi ile termal ve elektriksel

analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde farklı aylar için enerji ihtiyaçları hesaplanmış ve PVT entegreli CO₂ akışkanlı ısı pompası ile PVT entegresiz ısı pompasının performansları karşılaştırılmıştır. R290 ve R32 gibi farklı akışkanların da performansları değerlendirilmiştir. PVT entegreli CO₂ akışkanlı ısı pompası kış şartlarında ortalama COP değeri 2.841, yaz şartlarında ortalama COP değeri 5.8' dir. PVT entegresiz hava kaynaklı ısı pompası kış şartlarında ortalama COP değeri 2.273, yaz şartlarında ortalama COP değeri 4.501' dir. R290 akışkanlı PVT entegreli ısı pompası kış şartlarında ortalama COP değeri 6.982, yaz şartlarında ortalama COP değeri 6.857 ve R32 akışkanlı PVT entegreli ısı pompasının kış şartlarında ortalama COP değeri 4.471 yaz şartlarında ortalama COP değeri 4.501' dir. Elde edilen bulgulara göre, PVT entegreli CO₂ akışkanlı ısı pompası sistemi, PVT entegresiz ısı pompasına kıyasla daha verimli çalışmaktadır. Aynı şekilde, R290 akışkanlı ısı pompasının CO₂ ve R32 akışkanlı ısı pompalarına göre daha yüksek performans sergilediği tespit edilmiştir.

Liu ve diğ. (2023), güneş destekli DX-PVT ısı pompası sisteminin performansını incelemişlerdir. Yeni bir sistem yapılandırmasıyla PVT modüllerinin ekipman alanının etkisi değerlendirilmiştir. Analitik bir model geliştirilerek sistemin termal ve termodinamik parametreleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Simülasyonlar yapılarak A/V_{th} parametresinin sistem performansı üzerindeki etkisi ortaya koyulmuştur. Sonuçlar, A/V_{th} 'nin artışının COP'sini yükselttiğini ancak ısı kazanç faktörünü düşürdüğünü göstermiştir. Güneş ışınlamı 500 W/m²'den 800 W/m² olduğunda A/V_{th} 'nin 0.768'den 2.303 m²h/m³'e artmasıyla, COP artışı %42.8'den %70.9 olurken, ısı kazanç faktöründeki azalış ise %49.2'den %39.2 olmuştur.

Yang ve diğ. (2023), güneş fotovoltaik panellerinin güç üretimini artırmak ve güneş termal enerjisini etkili bir şekilde kullanmak için bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmada, yeni bir güneş fotovoltaik termal kolektörün hava kaynaklı ısı pompası sistemiyle birleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın adımları arasında enerji ve ekserji modellerinin geliştirilmesi, farklı çalışma akışkanlarının seçimi, sayısal simülasyonlar ve termodinamik performans analizi yer almaktadır. Bu çalışmalar MATLAB bağlantılı NIST REFPROP veri tabanında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, sistemdeki soğutmalı fotovoltaik panelin elektrik verimliliğinin kışın soğutulmamış fotovoltaik panele göre %4,1- %13,7, yazın ise %1,1 ~ %10,6 daha yüksek olduğunu ve R717'nin en uygun çalışma akışkanı olduğunu göstermiştir. Ayrıca PV panel alanının seçiminin sistemin

verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğu görölmüştür. Bu çalışma, güneş enerjisi kullanımında verimliliği artırmak ve enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmak için önemli bir adım olmuştur.

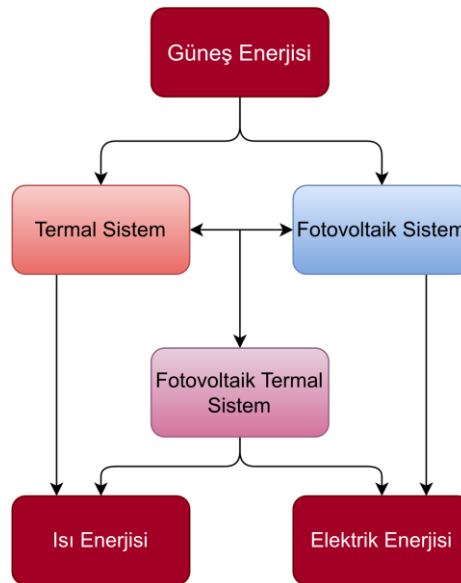


3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde PVT ve PVT-hava kaynaklı ısı pompası sisteminin teorik esasları sunulacak ve matematiksel modeli oluşturulacaktır.

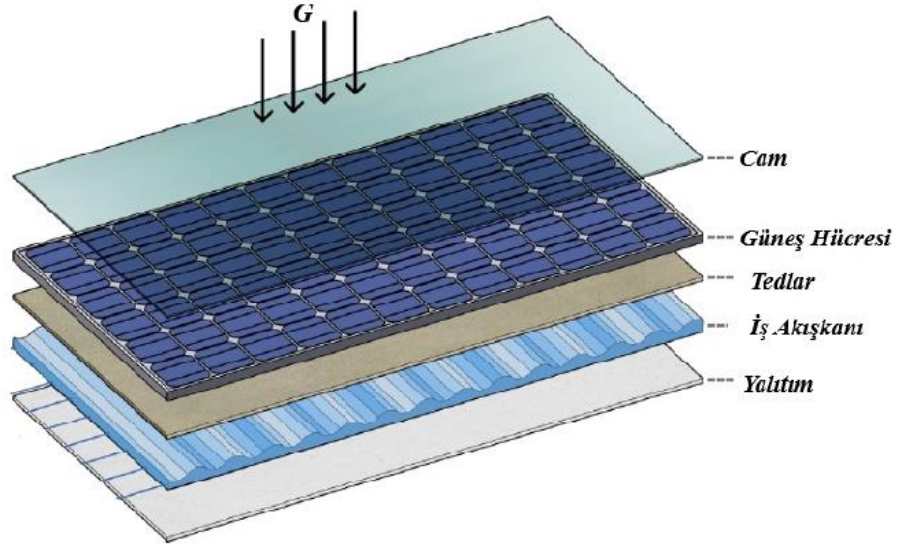
3.1. Fotovoltaik Termal (PVT) Güneş Paneli

Fotovoltaik-termal paneller (PVT paneller), hem elektrik üretimine hem de ısı eldesine imkân veren, güneş enerjisi toplama sistemleridir ve bu iki işlemi tek bir panel veya ekipman içinde birleştirirler. PVT hem elektrik hem de ısı üretmek ve güneş enerjisi dönüşümünün verimliliğini artırmak için tek bir modülde güneş fotovoltaik hücrelerinden (PV) ve güneş termal bileşenlerinden oluşan hibrit bir teknolojidir (Zhang ve diğ., 2012). Bu panellerde, güneş enerjisi ve elektrik üretimi tek bir bileşende birleştirilerek, PV modüllerinden daha yüksek genel verim elde edilir. Şekil 3.1’de güneş teknolojisinin şemasında fotovoltaik sistem sunulmuştur. Fotovoltaik hücrelerden genellikle %15-%20 arasında bir elektriksel verim elde edilirken güneşten alınan enerjinin büyük bir kısmı ise (%65-%70) termal enerjiye dönüşür ve PV modüllerinin sıcaklığını artırır (Kalogirou, 2007). Fotovoltaik hücrelerin artan sıcaklık ile verimi düşer. Her bir 1 °C artan hücre sıcaklığı için, elektrik verimi %0,2 ile %0,5 azalmaktadır (Zondag, 2006). Bu nedenle, PV hücreleri gaz ve/veya sıvı akışkan ile soğutulur ve ayrıca düşük sıcaklık PV hücre ömrünü artırır.



Şekil 3.1. Güneş teknolojisinin şeması (Kumar ve diğ., 2015)

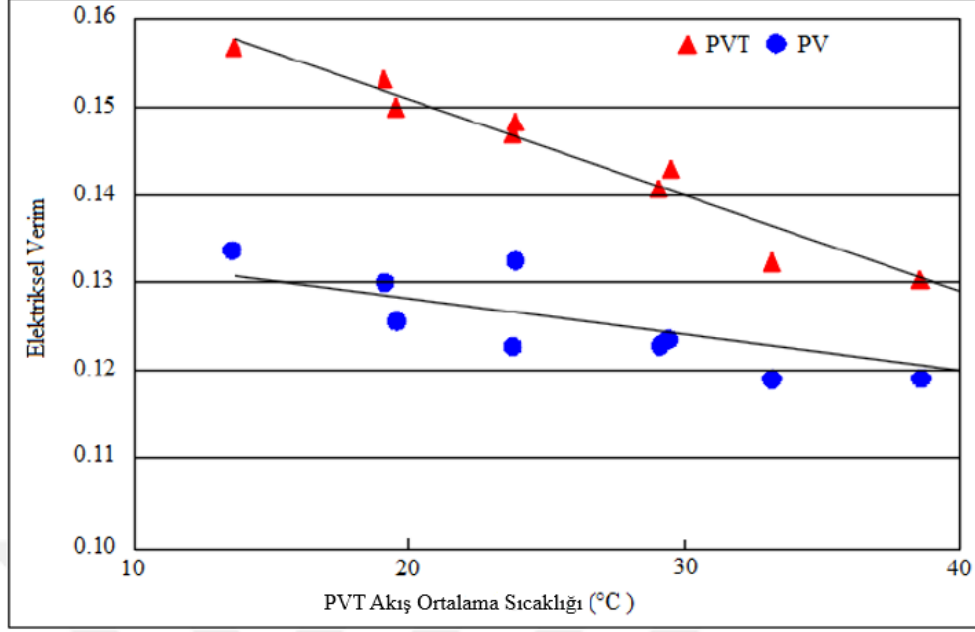
PVT katmanları Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi genellikle farklı malzemelerin ardışık olarak kullanıldığı bir yapıya sahiptir. En üst katmanında, koruyucu cam tabakası bulunur ve güneş ışınlarının panel üzerine düşmesine izin verirken aynı zamanda paneli dış etkenlere karşı korur. Altındaki katmanda genellikle Etilen Vinil Asetat (EVA) tabakası bulunur. Bu tabaka, güneş hücrelerini sızdırmaz bir şekilde kaplar ve ısı yalıtımı sağlar. Bir sonraki katmanda güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştüren güneş hücreleri yer alır. Bu hücreler, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirerek kullanılabilir elektrik üretirler. Daha sonra genellikle EVA tabakası tekrar kullanılır. En alt katmanda ise dayanıklılığı artırmak ve paneli dış hava koşullarından korumak için tedlar adı verilen bir malzeme kullanılır. Güneş hücrelerini soğutmak amacıyla hava, su veya soğutucu akışkan katmanı en altta bulunan yalıtım ile tedların arasında bulunabilir. PVT katmanları, güneş enerjisinin kullanımını maksimize etmek ve hem elektrik hem de termal enerji üretmek amacıyla bir araya getirilir.



Şekil 3.2. Fotovoltaik termal toplayıcının şematik enine kesit görünümü (Yang ve diğ., 2023)

Kim ve Kim (2012), sıvı soğutmalı PVT panelin elektriksel veriminin, paneli soğutma amacıyla kullanılan akışkanın sıcaklığına bağlı olduğunu ve akışkan sıcaklığının artmasıyla PVT panelin elektriksel veriminin azaldığını deneysel olarak gösterdiler. Onlara göre, PVT ve PV modülü arasındaki elektriksel verim farkı maksimum %2,4 olup, toplam ortalama fark %1,7'ye ulaşmaktadır. Kim ve Kim (2012) yaptıkları deneysel çalışmada, aynı test koşulları altında PVT modülün PV modülünden daha iyi elektriksel

performansa sahip olduğunu ve bu performansın tamamen ıslak soğurucu kullanılarak artırılabilceğini buldular. Ortalama akışkan sıcaklığı ile elektriksel verimin değişimi Şekil 3.3’ de sunulmuştur. Akışkan sıcaklığının artışı elektriksel verimi olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 3.3. PV modülü ve ıslak PVT panelinin ortalama akışkan sıcaklığı ile değişen elektriksel verimleri (Kim ve Kim, 2012)

Bu tezde göz önüne alınan PVT panelin karakteristikleri ve modülün özellikleri Çizelge 3.1 ve 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. PVT panelin karakteristikleri (Yang ve diğ., 2023)

PV modül parametreleri	Birim	Değer
L_{cam}	m	0.003
K_{cam}	W/ (m.K)	1
$(\alpha\tau)_{eff}$	-	0.7
$L_{hücre}$	m	3×10^{-4}
$K_{hücre}$	W/ (m.K)	0.039
Δ	m	0,05
E	-	0.88
$L_{yalıtım}$	m	0.05
$K_{yalıtım}$	W/ (m.K)	0.035

Çizelge 3.1.(Devam ediyor) PVT panelin karakteristikleri (Yang ve diğ., 2023)

L_{tedlar}	m	0.0005
K_{tedlar}	W/ (m.K)	0.033
τ_c	-	0.9
β_{pv}	-	0.9
α_b	-	0.8

Çizelge 3.2: SUNPOWER SPR-MAX3-400 PVT modülün özellikleri (Yang ve diğ., 2023)

PV Modül Parametreleri	Değer
Maksimum Güç	400 W
Boyutlar	1690x1046x40 mm
Hücrelerin numarası (N)	104 (Monokristal)
Alan (A)	1.65 m ²
Açık Devre Voltajı	75.6 V
Kısa Devre Akımı	6.84 A
Anma Gerilimi	65.8 V
Anma Akımı	6.08 A
Maksimum Panel Verimi	%22,6
Güç Sıcaklık Katsayısı	-0.29%/C

PVT panelinin hücre sıcaklığı (K) Denklem (3.1) ile bulunabilir (Yang ve diğ., 2023).

$$T_{hücre} = \frac{\sigma\tau_{eff}G + U_t T_{çevre} + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde $(\alpha\tau)_{eff}$ etkin geçirgenlik katsayısını, G güneş ışıınımını, U_t cam kapak aracılığıyla güneş pilinden ortama gelen ısı transfer katsayısını, $T_{çevre}$ ortam sıcaklığını, U_T güneş pilinden tedlar boyunca akan akışkana ısı transfer katsayısını ve T_{bs} ise tedların arka yüzey sıcaklığını göstermektedir. U_T aşağıdaki Denklem (3.2)'den bulunur (Yang ve diğ., 2023).

$$U_T = \left[\frac{L_{hücre}}{K_{hücre}} + \frac{L_{tedlar}}{K_{tedlar}} \right]^{-1} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklemde $L_{hücre}$ silikon solar hücre kalınlığı, L_{tedlar} tedlar kalınlığını, $K_{hücre}$ silikon solar hücre ısı iletim katsayısı ve K_{tedlar} tedlar ısı iletim katsayısıdır. Cam kapak aracılığıyla güneş pilinden çevre ortamına ısı transfer katsayısı U_t aşağıdaki Denklem (3.3)'den hesaplanır (Yang ve diğ., 2023).

$$U_t = \left[\frac{L_{cam}}{K_{cam}} + \frac{1}{h_{conv,t}} + \frac{1}{h_{rad}} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde L_{cam} PVT üzerindeki cam kapağın kalınlığı, K_{cam} cam kapağın ısı iletim katsayısı, $h_{conv,t}$ üst konveksiyon ısı transfer katsayısı ve h_{rad} ise ışınlımla ısı transfer katsayısıdır. $h_{conv,t}$ aşağıdaki Denklem (3.4) ile hesaplanır (Yang ve diğ., 2023).

$$h_{conv,t} = 2,8 + 3V_{rüz} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde $V_{rüz}$ rüzgâr hızıdır.

ışınlımla gerçekleşen ısı transfer katsayısı ise Denklem (3.5)'den hesaplanır (Yang ve diğ., 2023);

$$h_{rad} = \epsilon_g \sigma (T_{sky} + T_{hücre}) (T_{sky}^2 + T_{hücre}^2) \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde ϵ_g PVT emisyonu, σ Stefan–Boltzmann sabiti ve T_{sky} (K) ise gökyüzü sıcaklığıdır. Gökyüzü sıcaklığı, Denklem (3.6)'dan bulunur (Yang ve diğ., 2023);

$$T_{sky} = 0.0552 T_{çevre}^{1.5} \quad (3.6)$$

Tedlar tabakasının arka yüzey sıcaklığı ise Denklem (3.7)'den bulunur (Yang ve diğ., 2023);

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}\sigma\tau_{eff}G + U_{tT}T_{\zeta evre} + h_i T_f}{U_{tT} + h_i} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki h_i akışkanın ısı taşınım katsayısı ve T_f ise evaporatör sıcaklığıdır. Isı transfer katsayısı oranı olarak tanımlanabilen h_{p1} ise Denklem (3.8)'den bulunur;

$$h_{p1} = \frac{U_T}{U_T + U_t} \quad (3.8)$$

Camdan güneş hücresi boyunca tedlara olan toplam ısı transfer katsayısı, Denklem (3.9)'dan bulunur (Yang ve diğ., 2023);

$$U_{tT} = \left[\frac{1}{U_t} + \frac{1}{U_T} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

Çift fazlı bölge için kullanılan ısı taşınım katsayısı h_i denklem (3.10)'dan bulunur (Bisengimana ve diğ., 2021).

$$h_i = \left\{ \left[(1-x) + 1.2x^{0.8} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.37} \right]^{-2.2} + \left[\frac{h_v}{h_l} x^{0.01} \left(1 + 8(1-x)^{0.7} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.67} \right) \right]^{-2} \right\}^{-0.5} \quad (3.10)$$

Burada x kuruluk derecesi, ρ_l akışkanın sıvı yoğunluğu, ρ_v akışkanın buhar yoğunluğu, h_v buhar entalpisi ve h_l sıvı entalpidir.

Panelin soğutulması dikkate alınmamıştır ve panelin sıcaklığı Denklem (3.11) ile hesaplanmıştır (Skoplaki ve diğ., 2008):

$$T_{hücre} = T_{\zeta evre} + k \cdot G \quad (3.11)$$

Denklemdaki k sabiti Ross katsayısı olarak bilinir ve artan güneş ışınlamıyla birlikte ortam sıcaklığının üzerindeki sıcaklık artışını ifade eder. $k=0,025$ kabul edilmiştir (Skoplaki ve diğ., 2008).

PV modülü tarafından üretilen elektrik gücü, Denklem (3.12) ile hesaplanır (Yao ve diğ., 2021):

$$P_e = A \cdot G \cdot \tau_c \cdot \sigma_{pv} \cdot \beta_{pv} \cdot \eta_e \quad (3.12)$$

Burada A , PVT modülünün alanıdır. G ışıınım, τ_c PV cam kaplamanın geçirgenliğidir, β_{pv} paketleme faktörüdür, σ_{pv} PV hücrelerinin absorpsiyon oranıdır.

PV hücrelerinin elektriksel verimliliği aşağıdaki denklem ile bulunmuştur (Yao ve diğ., 2021):

$$\eta_{e,ideal} = \eta_{rc} \cdot [1 - \beta_p \cdot (T_{hücre} - T_{rc})] \quad (3.13)$$

η_{rc} , 25 °C'deki PV hücrelerinin standart fotovoltaiik verimlilik değeri; β_p , PV hücrelerinin etkinliğinin sıcaklık katsayısıdır, $T_{hücre}$, PV hücrelerinin sıcaklığıdır; T_{rc} , referans standart sıcaklığıdır (25 °C).

PVT paneli tarafından asimile edilen termal enerji Denklem (3.14) ile ifade edilebilir (Yao ve diğ., 2021):

$$Q_{abs} = A \cdot G \cdot \tau_c \cdot [\sigma_{pv} \cdot \beta_{pv} \cdot (1 - \eta_e) + \alpha_b \cdot (1 - \beta_{pv})] \quad (3.14)$$

α_b Süpürgeliğin emme oranıdır.

PVT modülünün toplam ısı kaybı oranı Q_L ile ifade edilir (Yao ve diğ., 2021).

$$Q_L = A \cdot U_L \cdot (T_{hücre} - T_{çevre}) \quad (3.15)$$

Burada $T_{çevre}$ çevre sıcaklığıdır; U_L toplam ısı kaybıdır (Yao ve diğ., 2021).

$$U_L = \left[\frac{1}{h_{conv,t}} + \frac{1}{h_{rad}} \right]^{-1} \quad (3.16)$$

PVT panele absorbe edilen ısı miktarından (Q_{abs}), toplam ısı kaybı (Q_L) çıkarılarak PVT panele transfer olan ısı miktarı (Q_{PVT}) bulunur (Yao ve diğ., 2021).

$$Q_{PVT} = Q_{abs} - Q_L \quad (3.17)$$

PVT modüle transfer edilen ısı enerji, paneli soğutma amacıyla kullanılan ve bu sırada kendisi buharlaşan soğutucu akışkana aktarılır. (Yao ve diğ., 2021).

$$Q_{evap} = Q_{PVT} \quad (3.18)$$

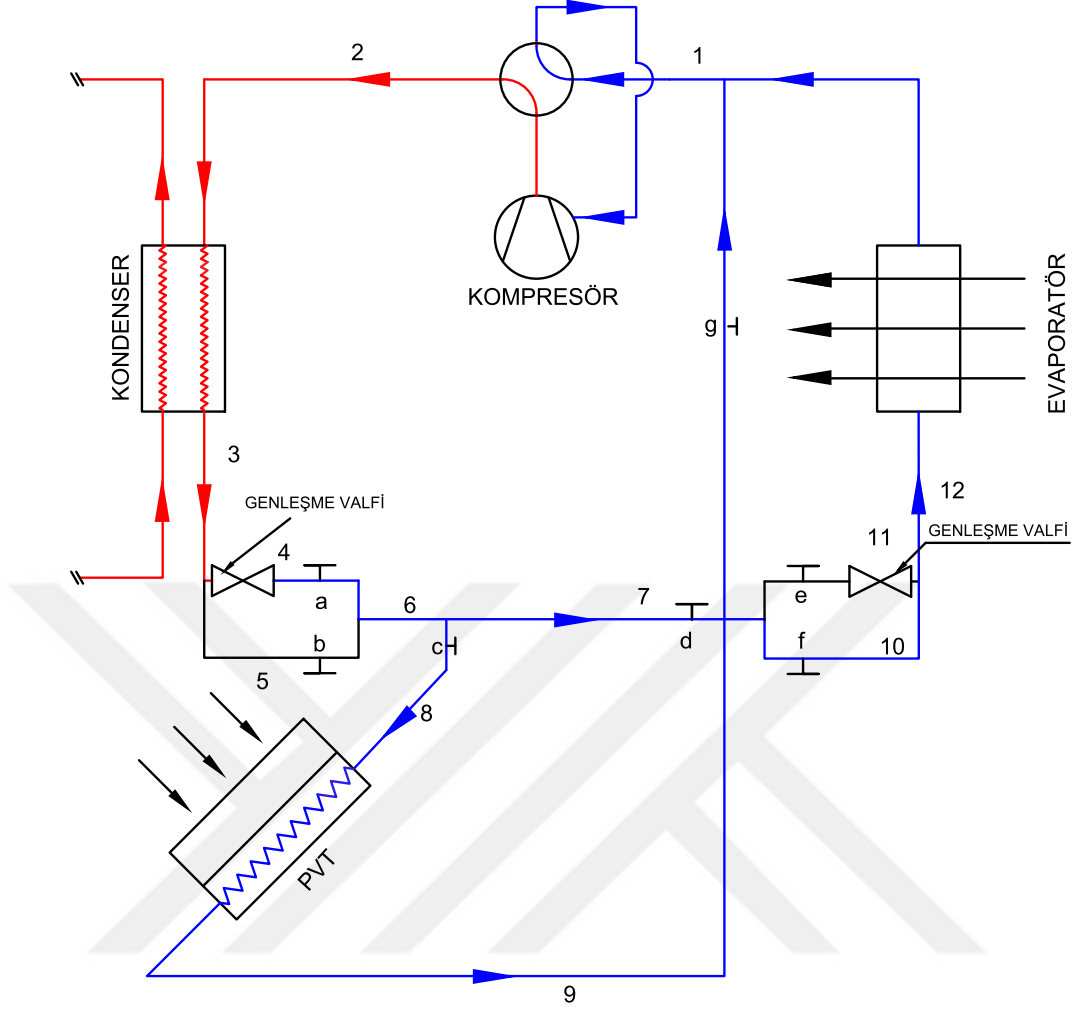
3.2. PVT-Isı Pompası Bütünleşik Sistemi

PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem tasarımı şeması Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.4 kış çalışma modunu gösterir. Dört yollu vanadan geçen düşük basınç ve sıcaklıktaki soğutucu akışkan kompresöre girer (durum 1), kompresörde yüksek basınç ve sıcaklıkta kızgın buhar durumuna sıkıştırılır (durum 2). Yüksek basınç ve sıcaklıktaki buhar sonrasında kondensere girer ve ısıtılacak ortama ısıyı transfer eder. Kondenserde akışkan yoğuşarak doymuş sıvı (durum 3) olarak çıkar. Daha sonra iş akışkanı, genleşme valfinden geçerken basıncı ve sıcaklığı düşerek ıslak buhar (durum 4) haline gelir. Daha sonra PVT'den ve/veya evaporatörden geçerek buharlaşan akışkan dört yollu vanaya oradan da kompresöre girer (1 durumu). Kış çalışma modunda PVT-Isı pompası bütünleşik sistemi 3 farklı modda kullanılabilir.

Mod 1 PVT'siz hava kaynaklı ısı pompası: 2-3-4-6-7-10-12-1 yolu izlenir ve “a, d, f” vanaları açık, “b, c, e, g” vanaları ise kapalı durumdadır.

Mod 2 PVT evaporatörlü ısı pompası: 2-3-4-6-8-9-1 yolu izlenir ve “a, c, g” vanaları açık, “b, d, e, f” vanaları ise kapalı durumdadır. PVT evaporatör görevi görür.

Mod 3 Çift (PVT evaporatörlü ve hava) kaynaklı ısı pompası: 2-3-4-6-8-9-10-12-1 yolu izlenir ve “a, c, f” vanaları açık “b, d, e, g” vanaları kapalıdır. Soğutucu akışkan hem PVT'den hem de dış ortam havasından ısı çeker. Isınım miktarı az ise yetersiz olması durumunda bu sistem tercih edilir.

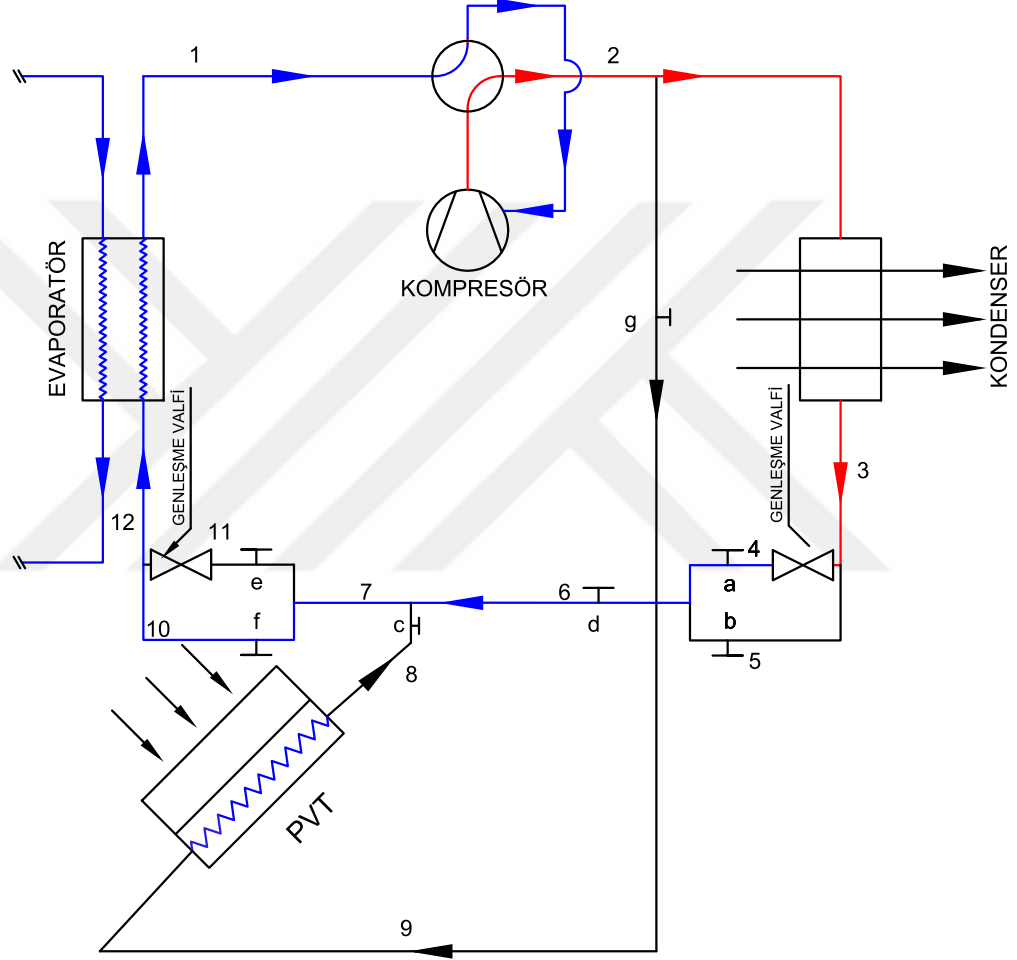


Şekil 3.4. PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem tasarımı şeması: kış çalışma modu

Şekil 3.5 yaz çalışma modunu gösterir; burada dört yollu vana yardımıyla akışkanın düşük basınçlı buharı (durum 1) kompresörde yüksek basınç ve sıcaklığa sıkıştırıldıktan sonra yüksek basınçlı buhar olarak çıkar (durum 2). Burada akışkan kondenserden geçerek ısıyı dış ortama atar, bu esnada yoğunlaşır ve doymuş sıvı olarak çıkar (durum 3). Daha sonra genişleme valfinden geçerek düşük basınçlı ıslak buhar durumuna gelir (durum 4). PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem yaz çalışma modunda 2 farklı modda kullanılabilir.

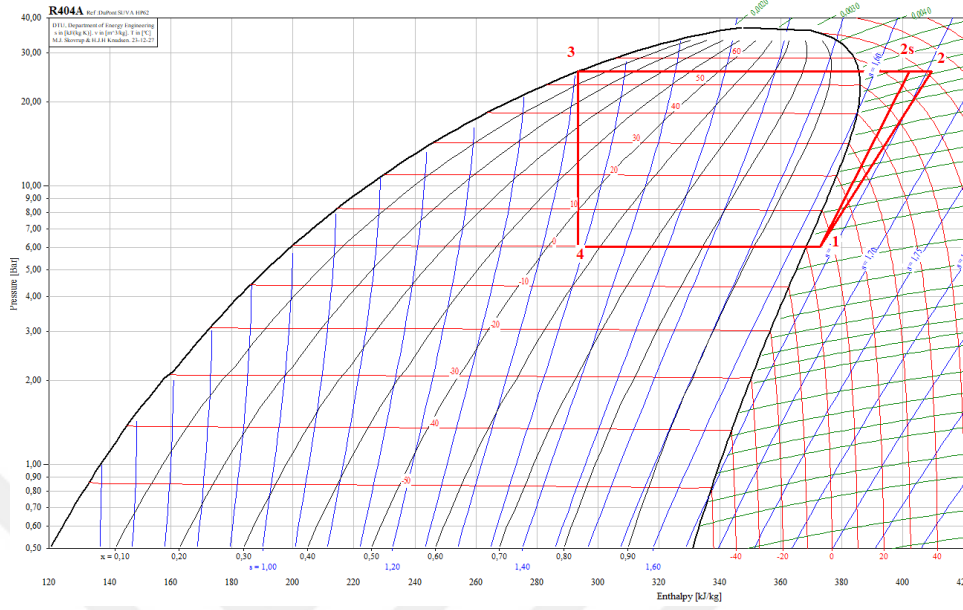
Mod 1 PVT'siz ve soğutma modunda ısı pompası: 2-3-4-6-7-10-12-1 yolu izlenir ve “a, d, f” vanaları açık, “b, c, e, g” vanaları ise kapalıdır. Soğutma modunda çalışan klasik bir ısı pompası çalışma şeklidir, ısıtım olmadığında (örneğin gece saatlerinde) tercih edilir.

Mod 2 PVT'li ve soğutma modunda ısı pompası: 2-3-4-9-8-7-10-12-1 yolu izlenir, “a, c, f” vanaları açık ve “b, d, e, g” vanaları kapalıdır. Hem PVT hem de konut/ofis soğutulmuş olur. PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem kullanılır. Burada 4 durumundan sonra akışkan PVT'ye girer ve burada PV panelinin arka yüzeyinden ısıyı çeker ve evaporatöre ilerler. Burada buharlaşan akışkan yüksek basınç ve sıcaklığa sıkıştırılmak üzere kompresöre gönderilir.



Şekil 3.5. PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem tasarımı şeması: yaz çalışma modu

Isı pompası çevrimi için P-h diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Isı pompası çevrimi için P-h diyagramı (Skovrup,2000-CoolPack)

Enerjinin ve kütlenin korunumu yasalarına göre aşağıda verilen denklemler elde edilmiştir. Isı pompası sistemleri için en çok kullanılan performans ölçütü ısıtma performans katsayısı (COP_{IP}) ve soğutma performans katsayısıdır (COP_{SM}).

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_{komp}} \quad (3.19)$$

$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{komp}} \quad (3.20)$$

Evaporatör soğutma kapasitesi Denklem (3.21) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m} * (h_1 - h_4) \quad (3.21)$$

Kondenser ısıtma kapasitesi Denklem (3.22) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{kon} = \dot{m} * (h_2 - h_3) \quad (3.22)$$

Aşırı kızdırma Denklem (3.23) ile hesaplanır.

$$\Delta T_{AK}=5\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.23)$$

Kompresörde tüketilen güç, izentropik, elektrik ve mekanik verim kullanılarak Denklem (3.24) ile hesaplanabilmektedir. Bu tez çalışmasında kompresör olarak CoolSelector uygulamasından hermetik scroll kompresör (VLZ028TGA) seçilmiştir. Hermetik scroll kompresörler, özellikle iklimlendirme ve ısı pompası uygulamaları için tercih edilen bir seçenektir. Bu kompresörler, yüksek soğutma kapasitesi, güvenilir çalışma, enerji verimliliği ve düşük ses seviyesi gibi avantajlar sunar.

$$\dot{W}_{komp} = \frac{\dot{m}*(h_{2s}-h_1)}{\eta_{is}*\eta_{mek}*\eta_{elk}} \quad (3.24)$$

Strok hacmi belli bir kompresör için soğutucu akışkan miktarı Denklem (3.25) ile hesaplanır. Burada v kompresör girişindeki akışkanın özgül hacmi ve λ doldurma oranı ve V_s strok hacmidir.

$$\dot{m}=\lambda.V_s/v \quad (3.25)$$

Kompresör gücü hesabında kompresör verimleri, doldurma oranı vb. parametrelerin seçilen kompresör için değerleri net olarak bilinmediğinden kütleli debi, kompresör çıkış sıcaklığı ve kompresör gücü, firma tarafından gerçek sonuçlara uygun olarak sağlanan aşağıdaki polinom ve katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır (Danfoss, 2014).

$$Y = f(T_{evap}, T_{kon}, n) \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} Y = & C0 + C1T_{evap} + C2T_{kon} + C3T_{evap}^2 + C4T_{kon}^2 + C5T_{evap}T_{kon}n^2 \\ & + C6T_{evap}^2T_{kon}n^2 + C7T_{evap}T_{kon}^2n^2 + C8T_{evap}T_{kon}n + C9T_{evap}^2T_{kon}n \\ & + C10T_{evap}T_{kon}^2n + C11T_{evap}T_{kon} + C12T_{evap}^2T_{kon} + C13T_{evap}T_{kon}^2 \\ & + C14T_{evap}^3 + C15T_{kon}^3 + C16n + C17T_{evap}n + C18T_{kon}n + C19T_{evap}^2n \\ & + C20T_{kon}^2n + C21T_{evap}^3n + C22T_{kon}^3n + C23n^2 + C24T_{evap}n^2 \\ & + C25T_{kon}n^2 + C26T_{evap}^2n^2 + C27T_{kon}^2n^2 + C28T_{evap}^3n^2 + C29T_{kon}^3n^2 \end{aligned} \quad (3.27)$$

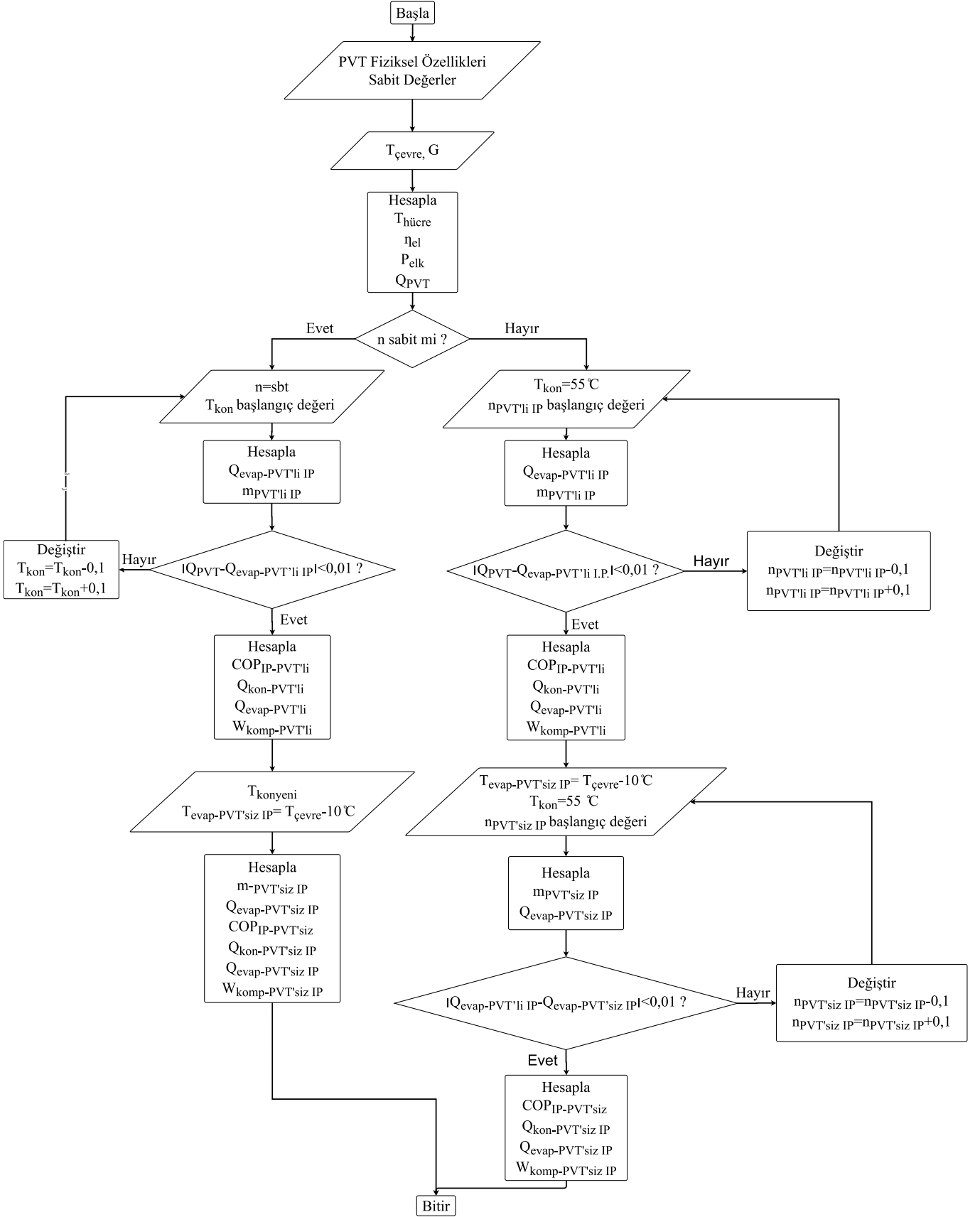
Denklem (3.27)'de Y ; kütleli debi (m) veya kompresör çıkış sıcaklığı (T_2) veya kompresör gücü (W_{komp})'dır. Bu denklemdeki “C” katsayıları “ m ”, “ W_{komp} ”, “ T_2 ” için farklı bir değerde olup bu polinom ve katsayılar Ek-1’de verilmiştir.

PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistemin analizinde EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılmıştır. EES, bir dizi cebirsel denklemin çözümünü sağlayan ve diferansiyel denklemleri, karmaşık değişkenlere sahip denklemleri çözebilen, optimizasyon yapabilen, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon sağlayabilen ve grafikler oluşturabilen bir mühendislik denklem çözme programıdır. EES, denklemleri otomatik olarak tanıyabilir ve aynı anda çözülmesi gereken denklemleri gruplayabilir, bu da kullanıcı için işlemi basitleştirir ve çözücünün en iyi verimlilikle çalışmasını sağlar. Ayrıca, mühendislik hesaplamaları için kullanışlı bir dizi yerleşik matematiksel ve termodinamik özellik işlevi sunar. Örneğin, buhar tabloları, herhangi bir termodinamik özelliği diğer iki özellik terimine bağlı olarak yerleşik bir işlev çağrısı ile elde edebilmenizi sağlar. EES, tasarım problemlerini çözmek için Parametrik Tablo özelliği sunar. Kullanıcılar bağımsız değişkenleri tabloya girdikten sonra, EES bağımlı değişkenlerin değerlerini hesaplar ve bu ilişkileri yayın kalitesinde grafiklerle görselleştirebilir (EES Manuel).

PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem ısıtma modu için oluşturulan algoritma aşağıdaki gibi olup akış diyagramı Şekil 3.7’de verilmiştir.

1. PVT fiziksel özelliklerini ve sabit değerleri gir.
2. Çevre şartlarını gir: $T_{\text{çevre}}$, G , $V_{\text{rüz}}$
3. PVT’li IP evaporatör sıcaklığını çevre sıcaklığına eşit al.
4. PVT modelini hesapla.
5. Devir sayısı sabit ise başlangıç için bir kondenser sıcaklığı gir.
6. PVT’li IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
7. PVT ısı enerji miktarı ve PVT’li IP evaporatör kapasitesi farkı 0,01’den küçükse devam et, değilse kondenser sıcaklığının değişmesi için adım 5’e geri dön.
8. PVT’li IP modelini hesapla.
9. PVT’siz evaporatör sıcaklığını çevre sıcaklığından 10 °C düşük al. Yeni kondenser sıcaklığını al.

10. PVT'siz ısı pompası modelini hesapla.
11. Çıktıları al.
12. Devir sayısı değişkense kondenser sıcaklığını 55°C al ve başlangıç için bir devir sayısı gir. (Kondenserin suyu ısıtma sıcaklığı $45\text{-}50^{\circ}\text{C}$ olması istendiği için 55°C kondenser sıcaklığı kabul edilmiştir.)
13. PVT'li IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
14. PVT ısı enerji miktarı ve PVT'li IP evaporatör kapasitesi farkı $0,01$ 'den küçükse devam et, değilse PVT'li ısı pompası devir sayısının değişmesi için adım 12'ye geri dön.
15. PVT'li IP modelini hesapla.
16. PVT'siz evaporatör sıcaklığını çevre sıcaklığından 10°C düşük al. Kondenser sıcaklığını 55°C al. Bir başlangıç PVT'siz IP devir sayısı gir.
17. PVT'siz IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
18. PVT'li IP evaporatör kapasitesi ve PVT'siz IP evaporatör kapasitesi farkı $0,01$ 'den küçükse devam et, değilse PVT'li ısı pompası devir sayısının değişmesi için adım 16'ya geri dön.
19. PVT'siz IP modelini hesapla.
20. Çıktıları al.



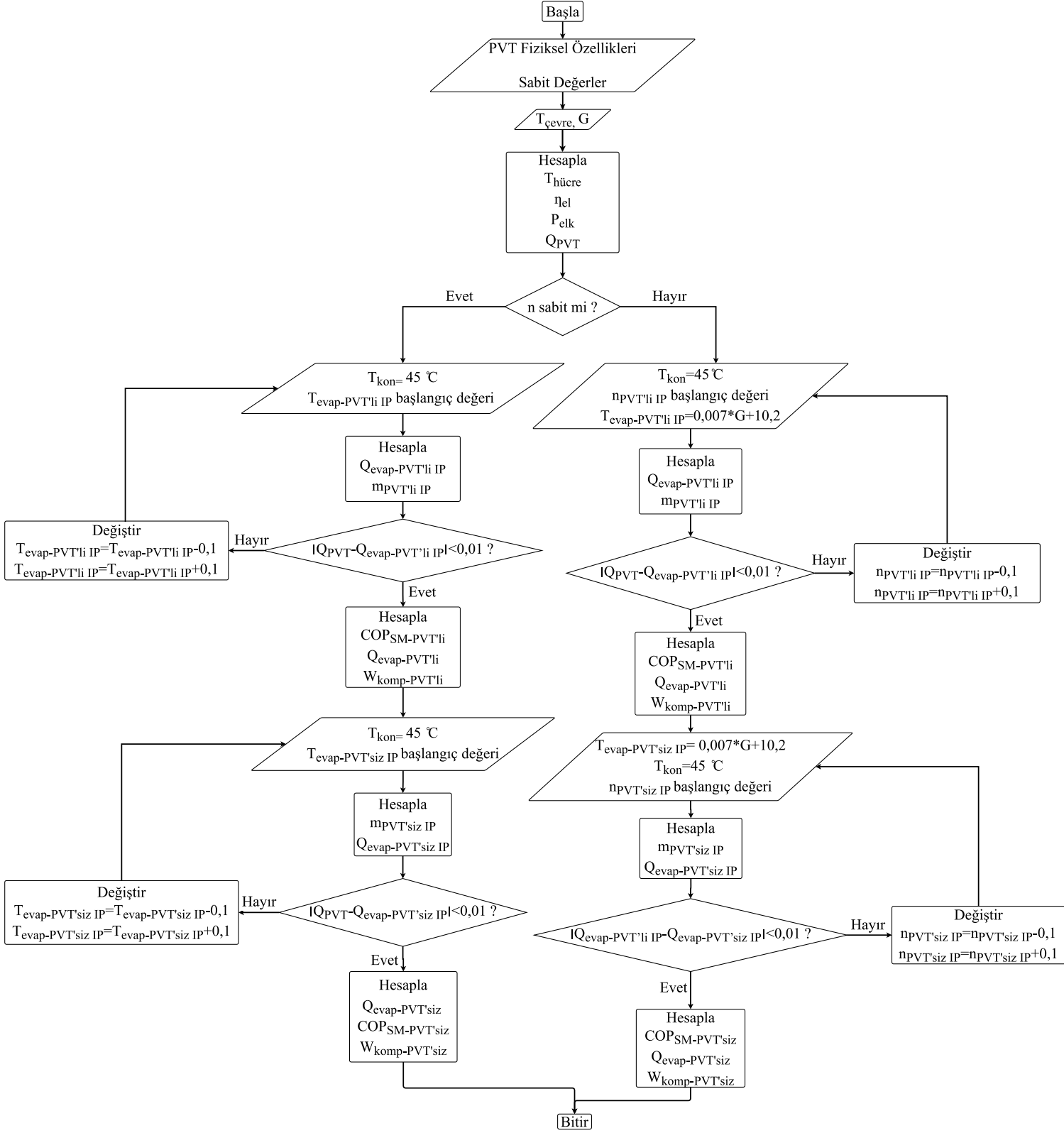
Şekil 3.7. PVT ve ısı pompası bütünlük sisteminin ısıtma modu akış şeması

PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sistem soğutma modu için algoritma aşağıdaki gibidir. Akış şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.

1. PVT fiziksel özelliklerini ve sabit değerleri gir.
2. Çevre şartlarını gir: $T_{\text{çevre}}$, G , $V_{\text{rüz}}$
3. PVT’li IP evaporatör sıcaklığını çevre sıcaklığına eşit al.
4. PVT modelini hesapla.
5. Devir sayısı sabit ise kondenser sıcaklığını 45°C al. PVT’li ısı pompası evaporatör sıcaklığı için bir başlangıç değeri gir. (Soğutma sezonu için çevre sıcaklığı 32 °C’yi bulduğu için kondenser sıcaklığı 45 °C kabul edilmiştir.)
6. PVT’li IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
7. PVT ısııl enerji miktarı ve PVT’li IP evaporatör kapasitesi farkı 0,01’den küçükse devam et, değilse evaporatör sıcaklığının değişmesi için için adım 5’e geri dön.
8. PVT’li IP modelini hesapla.
9. PVT’siz evaporatör sıcaklığı için bir başlangıç değeri gir. Kondenser sıcaklığını 45 °C al.
10. PVT’siz IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
11. PVT ısııl enerji miktarı ve PVT’siz IP evaporatör kapasitesi farkı 0,01’den küçükse devam et, değilse evaporatör sıcaklığının değişmesi için için adım 9’a geri dön.
12. PVT’siz IP modelini hesapla.
13. Çıktıları al.
14. Devir sayısı değişkense kondenser sıcaklığını 45°C al, PVT’li ısı pompası için bir başlangıç devir sayısı gir ve PVT’li ısı pompası evaporatörü için ısınıma bağlı $0,007 \cdot G + 10,2$ bağlantısını kur.
15. PVT’li IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
16. PVT ısııl enerji miktarı ve PVT’li IP evaporatör kapasitesi farkı 0,01’den küçükse devam et, değilse PVT’li ısı pompası devir sayısının değişmesi için için adım 14’e geri dön.
17. PVT’li IP modelini hesapla.
18. Kondenser sıcaklığını 40°C al, PVT’siz ısı pompası için bir başlangıç bir devir sayısı gir ve PVT’siz ısı pompası evaporatörü için ısınıma bağlı $0,007 \cdot G + 10,2$ bağlantısını kur.

19. PVT'siz IP debisini ve evaporatör kapasitesini hesapla.
20. PVT'li IP evaporatör kapasitesi ve PVT'siz IP evaporatör kapasitesi farkı 0,01'den küçükse devam et, değilse PVT'li ısı pompası devir sayısının değişmesi için adım 18'e geri dön.
21. PVT'siz IP modelini hesapla.
22. Çıktıları al.





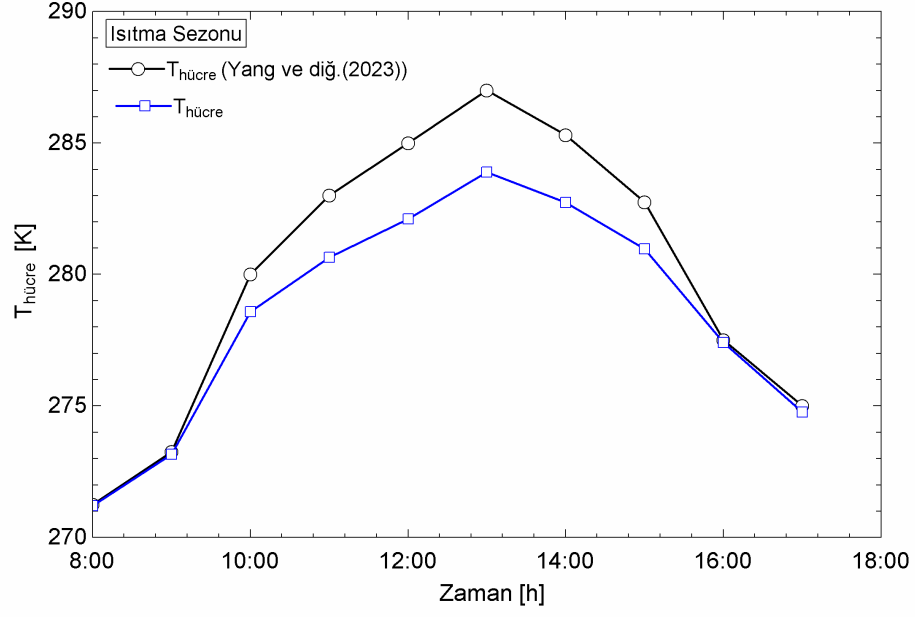
Şekil 3.8. PVT ve ısı pompası bütünleşik sisteminin soğutma modu akış şeması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

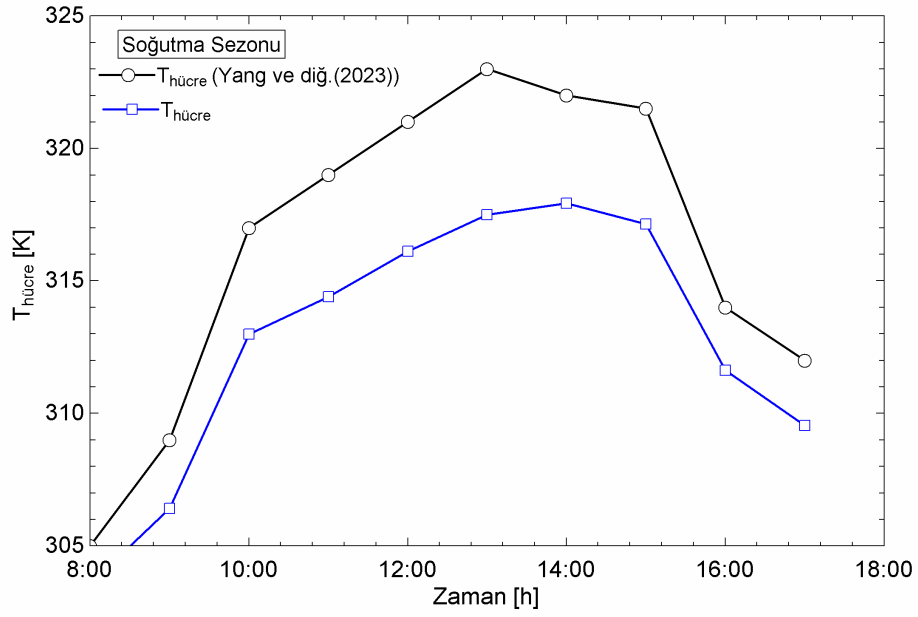
Bu bölümde tasarlanan PVT ve hava kaynaklı ısı pompası bütünleşik sisteminin teorik analiz sonuçları verilmiştir. Tasarlanan bütünleşik sistem konut/ofisin ısıtılması-soğutulması ve elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılabilir. Konut/ofis için ısıtma ihtiyacının olduğu aylar Ekim-Mart ayları; soğutma ihtiyacının olduğu aylar ise Nisan- Eylül ayları olarak alınmıştır. Öngörülen sistemde R404A soğutucu akışkan kullanan sabit ve/veya değişken devirde çalışabilen hermetik scroll kompresörlü (VLZ028TGA) hava kaynaklı ısı pompasının ve SUNPOWER SPR-MAX3-400 PVT modülünün kullanıldığı düşünülmüştür. Materyal ve yöntemde sunulan denklemler ile bütünleşik sistemin matematiksel modeli kurulmuş ve oluşturulan çözüm algoritmaları EES'ye (Engineering Equation Solver) aktararak PVT'nin ve ısıtma-soğutma modlarında bütünleşik sistemin enerjetik analizleri yapılmıştır. Işınım miktarı, PVT (fotovoltaik termal) kolektör alanı ve çevre sıcaklığı parametrelerinin her birinin PVT panellerden üretilen elektrik gücüne, PVT'nin elektriksel verimine, kompresör güç tüketimine, bütünleşik (PVT + ısı pompalı) ve PVT'siz (sadece ısı pompalı) sistemin ısıtma ve soğutma kapasitelerine ve performans katsayılarına etkileri incelenmiştir. Öngörülen sistemin, Antalya'da kurulması durumunda Antalya ilinin 2022 yılı dış ortam sıcaklık ve ısıtım değerleri kullanılarak, aylık bazda gündüz saatlerinde (dinamik) termal performansı analiz edilmiştir.

4.1. PVT Modelinin Doğrulanması ve Kompresör Modeli

Yang ve diğ. (2023), ısıtma-soğutma sezonunda R134a ile soğutulan ve Çizelge 3.2 de özellikleri verilen SUNPOWER SPR-MAX3-400 PVT modülü hücre sıcaklıklarını teorik ve deneysel olarak karşılaştırarak kurduğu PVT modelini yaz aylarında %1,61 kış aylarında %3,33 hata oranıyla doğrulamıştır. Bu tez çalışmasında da aynı PVT modülünün (SUNPOWER SPR-MAX3-400) kullanıldığı ve Yang ve diğ. (2023)'nin çalışmasından farklı olarak PVT soğutucusu olarak R404A kullanıldığı düşünülmüştür. Şekil 4.1'de Yang ve diğ. (2023)'nin teorik sonuçları ile bu tez çalışmasında kurulan modelin teorik sonuçları karşılaştırılmış kış aylarında %0,51 ve yaz aylarında %1,16 hata oranı bulunmuştur. Buna göre PVT için kurulan modelin, deneysel olarak doğrulanan Yang ve diğ. (2023)'nin teorik modeli ile uyumlu olduğu söylenebilir.



(a)



(b)

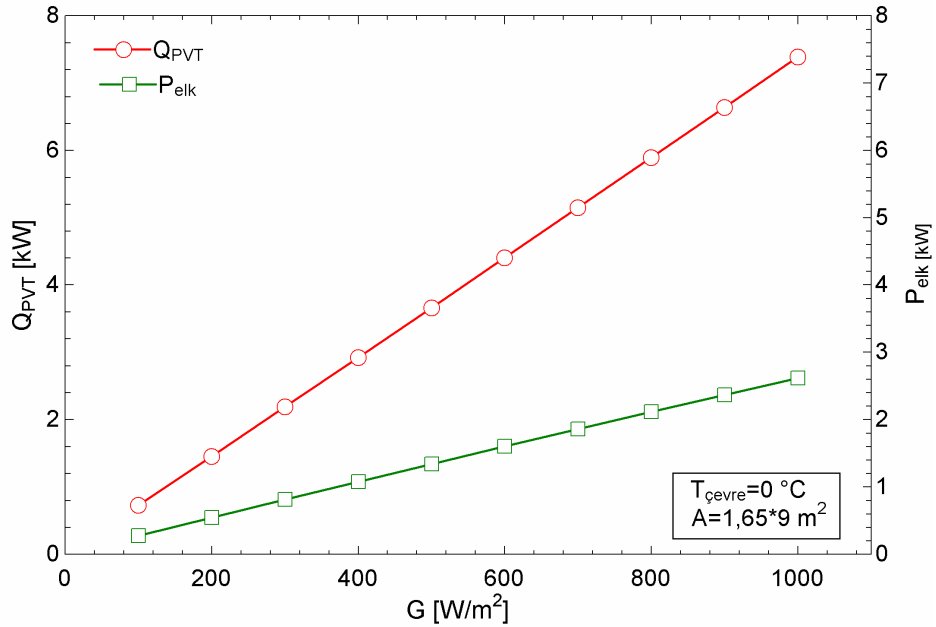
Şekil 4.1. Isıtma ve soğutma sezonları için karşılaştırmalı PVT hücre sıcaklıkları

Tasarlanan PVT'li ve PVT'siz sabit ve değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için kompresör olarak CoolSelector yazılımından hermetik scroll kompresör (VLZ028TGA) seçilmiştir. Kütleli debi, kompresör çıkış sıcaklığı ve kompresör gücü, firma tarafından gerçek sonuçlara uygun olarak sağlanan polinom ve katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır. Evaporatör ve kondenser sıcaklığı ile devir sayısına bağlı olarak oluşturulan bu polinom ve katsayılar EK-1'de sunulmuştur.

4.2. PVT'nin Termodinamik Analiz Sonuçları

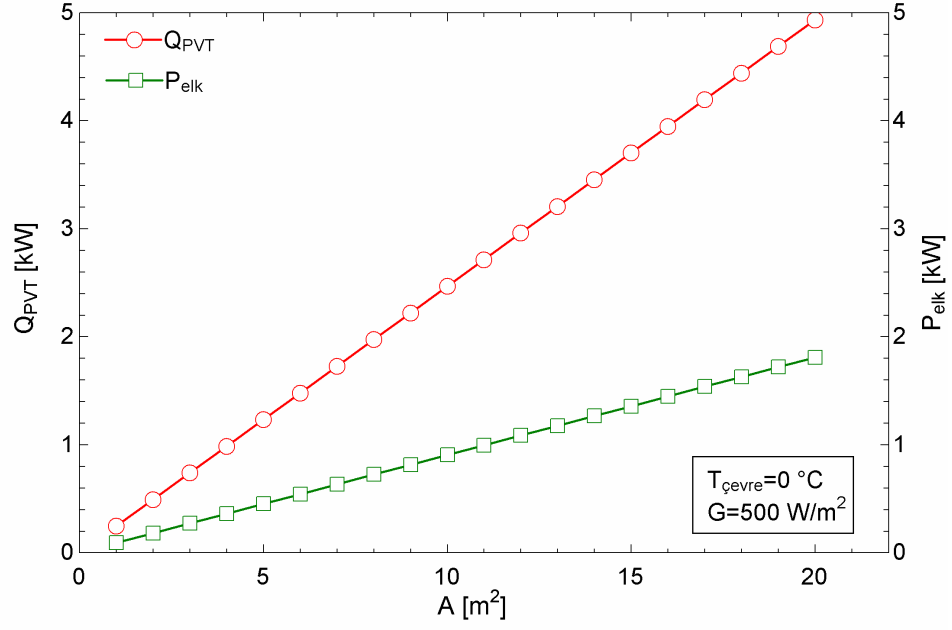
PVT modülü olarak SUNPOWER SPR-MAX3-400 seçilmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde verilen Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'deki PVT özellikleri yapılan hesaplamalarda kullanılmıştır. PVT bu bölümde ısı pompası sisteminden ayrı olarak incelenmiştir. Şekil 4.2'de ışınlam (G), çevre sıcaklığı ($T_{\text{çevre}}$) ve PVT alanına (A) bağlı olarak PVT'den çekilen ısıl enerji miktarı (Q_{PVT}) ve elektrik üretimi (P_{elk}) gösterilmektedir.

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere Denklem (3.12-14,15-3.17)'ye göre PVT alanı ve ışınlam miktarı arttıkça çekilen ısıl enerji miktarı (Q_{PVT}) ve elektrik üretimi (P_{elk}) artmaktadır. Çevre sıcaklığı arttığında ise üretilen ısıl enerji miktarı artmakta ancak PV panel hücre sıcaklığı arttığından üretilen elektriksel güç düşmektedir. Bu durumda, panellerin soğutulması veya sıcaklığın etkilerini azaltacak tasarım önlemleri alınması gerekmektedir.

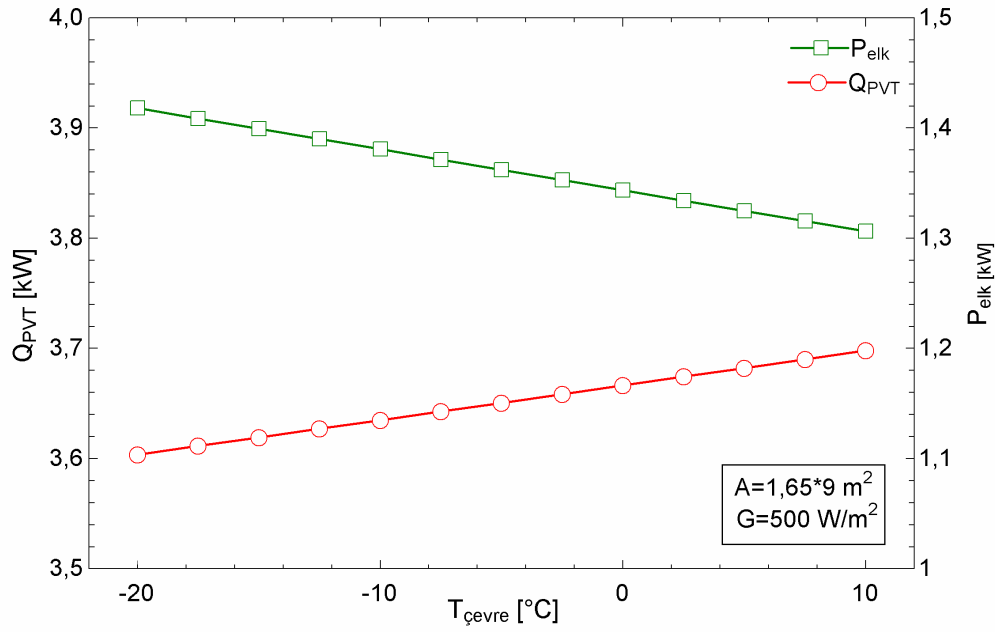


(a)

Şekil 4.2. PVT'den çekilen ısıl enerji ve elektrik üretiminin (a) ışınlamaya göre değişimi



(b)

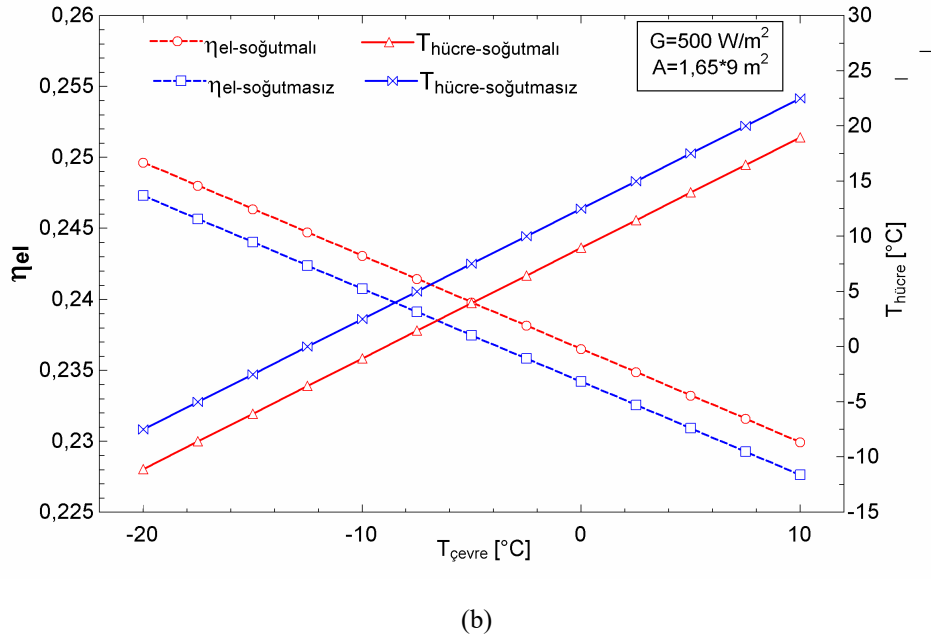
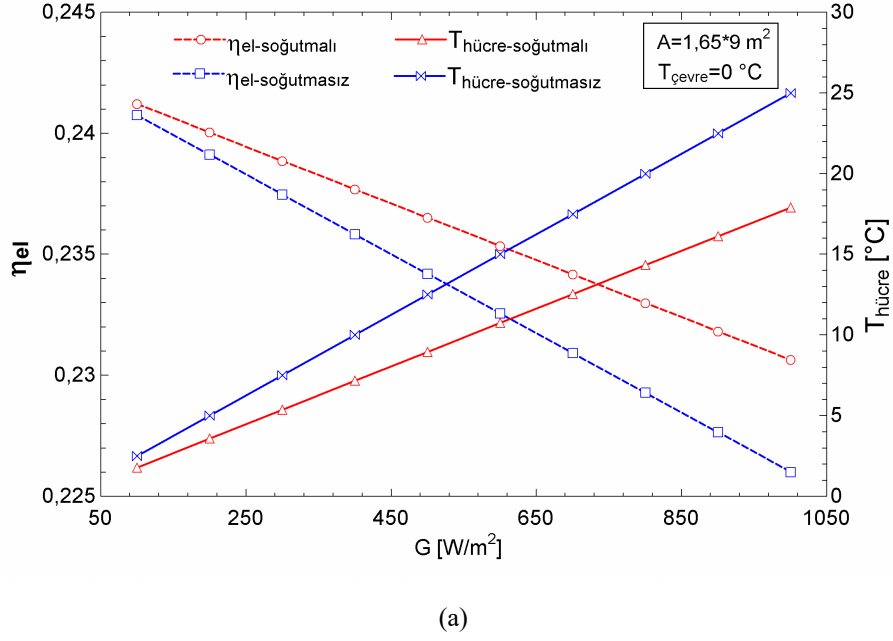


(c)

Şekil 4.2. (Devam ediyor) PVT'den çekilen ısı enerjisi ve elektrik üretiminin (b) alana göre; (c) çevre sıcaklığına göre değişimi

Şekil 4.3'te PV panel soğutulduğunda ve soğutulmadığında ışıının ve çevre sıcaklığının verim ve hücre sıcaklığı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Işınım ve çevre sıcaklığı artışı hücre sıcaklığını artırır. PV paneli soğutulmadığında hücre sıcaklığı artmakta ve verim düşmektedir. Soğutulduğunda ise hücre sıcaklığının azaldığı ve

verimin arttığı görülmektedir. Örneğin ışınlım 1000 W/m^2 , çevre sıcaklığı 0°C ve PVT alanı $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ iken PVT paneli soğutulduğunda hücre sıcaklığı 25°C 'den $17,8^\circ\text{C}$ 'ye düşmekte ve elektriksel verim $0,226$ 'dan $0,23$ 'e artmaktadır. Bu şartlar altında elektriksel verimdeki artış $\%1,76$ kadardır. Buna göre bu şartlar altında panel 1°C soğutulduğunda elektriksel verim $\%0,24$ artmaktadır.



Şekil 4.3. PV paneli soğutulduğunda ve soğutulmadığında elektriksel verim ve hücre sıcaklığı (a) ışınlıma bağlı olarak değişim; (b) çevre sıcaklığına bağlı olarak değişim

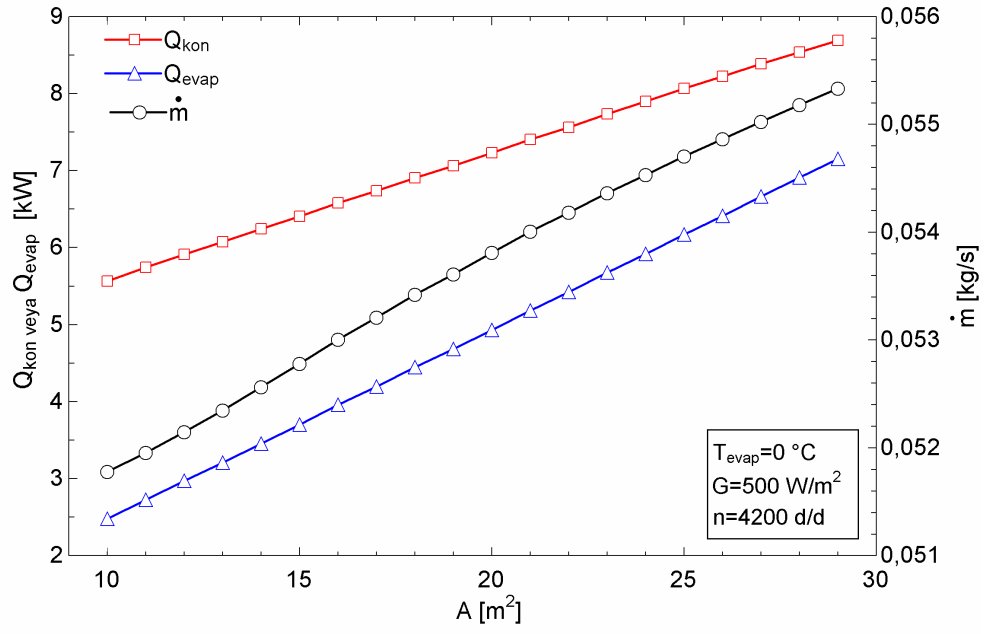
4.2. Sabit Devirde Çalışan Kompresörlü PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Termodinamik Analiz Sonuçları

Bu bölümde sabit devirde çalışan kompresörlü sistemin kolektör alanının, ısıtım ve çevre sıcaklığının diğer performans parametrelerin nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bütünleşik sistemin ısı pompasında, sabit devirde çalışan 5 kW soğutma kapasiteli hermetik scroll kompresör (VLZ028TGA) kullanıldığı düşünülmüştür. Bu nedenle sistemin PVT çalışma şartları ve çevre sıcaklığına bağlı olarak evaporatör sıcaklığı değiştiğinde kondenser sıcaklığının da değişmesi gerektiğinden, kondenser sıcaklığı parametresi de incelenmiştir.

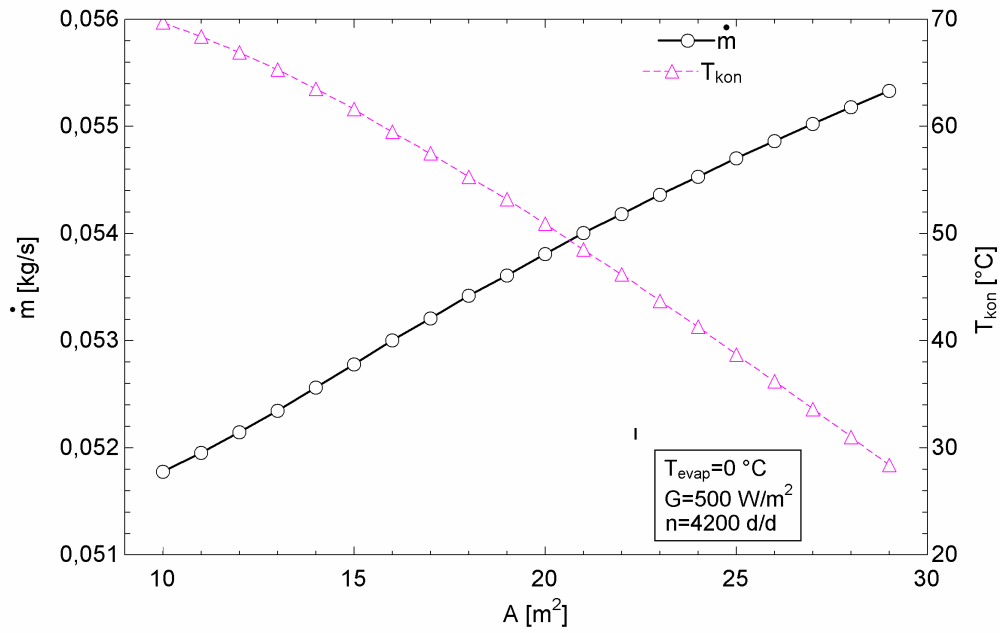
4.2.1. Kolektör alanının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi

PVT kolektör alanının kondenser ve evaporatör kapasitesi, soğutucu akışkanın debisi, sistem için harcanan kompresör gücü, elektrik üretimi ve COP ısıtma parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Şekil 4.4-a'da görüldüğü üzere fotovoltaik termal panel alanı arttıkça panelden çekilen ısı enerjisi (Q_{PVT}) artar. Yani ısı pompasına verilen ısı enerjisi (Q_{evap}) de artar. Isı pompasına verilen ısı enerjisi arttıkça Şekil 4.4-b'de debi miktarının da arttığı görülmektedir. Bu sonuç sabit devirde çalışan ısı pompası/soğutma makinesi için beklenen bir durumdur. Böylelikle kondenser sıcaklığı ve kompresör tüketim gücü azalır (Şekil 4.4-c). Kondenserden atılan ısı güç ise (Q_{kon}) ise artar. Bu da bütünleşik sistemin COP ısıtma değerini yükseltir (Şekil 4.4-d). Örneğin; evaporatör sıcaklığı $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ısıtım miktarı 500 W/m^2 ve 4200 d/d şartlarında alan 10 m^2 'den 20 m^2 'ye 2 kat artırıldığında debi %3,9 ve ısıtma kapasitesi %30,05 artmaktadır. Bu esnada kondenser sıcaklığı $18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ düşmüştür. Kompresör tüketim gücü %27,54 azalmıştır. Böylece COP_{IP} %79,44 artmıştır.

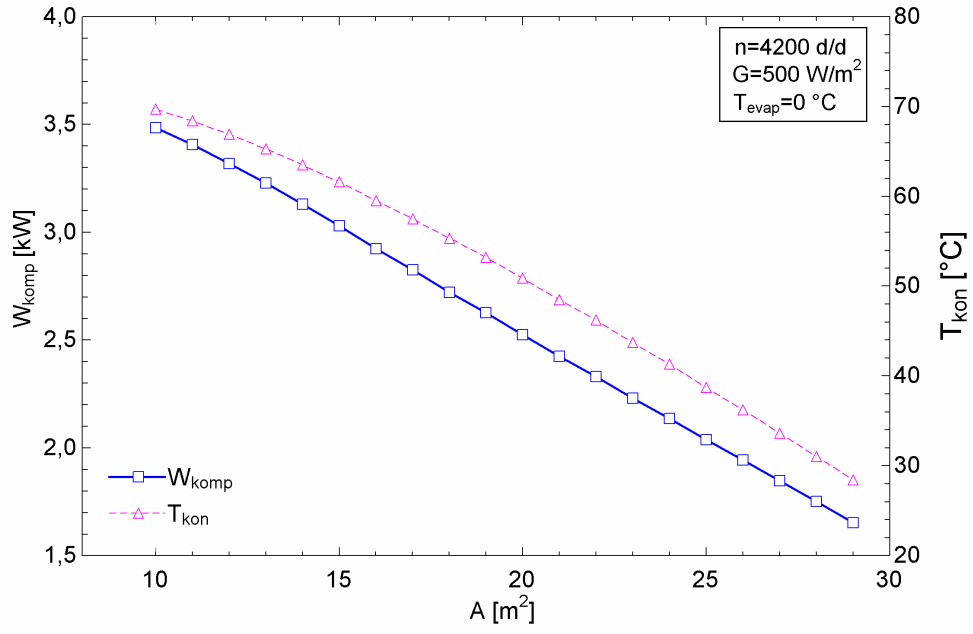


(a)

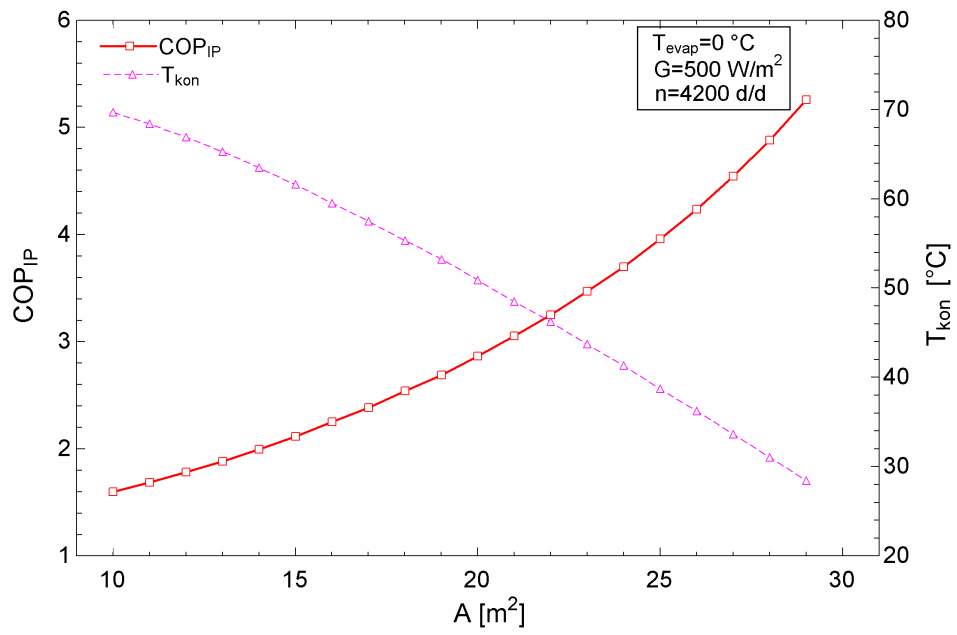


(b)

Şekil 4.4. Alan ile (a) evaporatör, kondenser kapasitesi ve debi değişimi(b) debi ve kondenser sıcaklığı değişimi



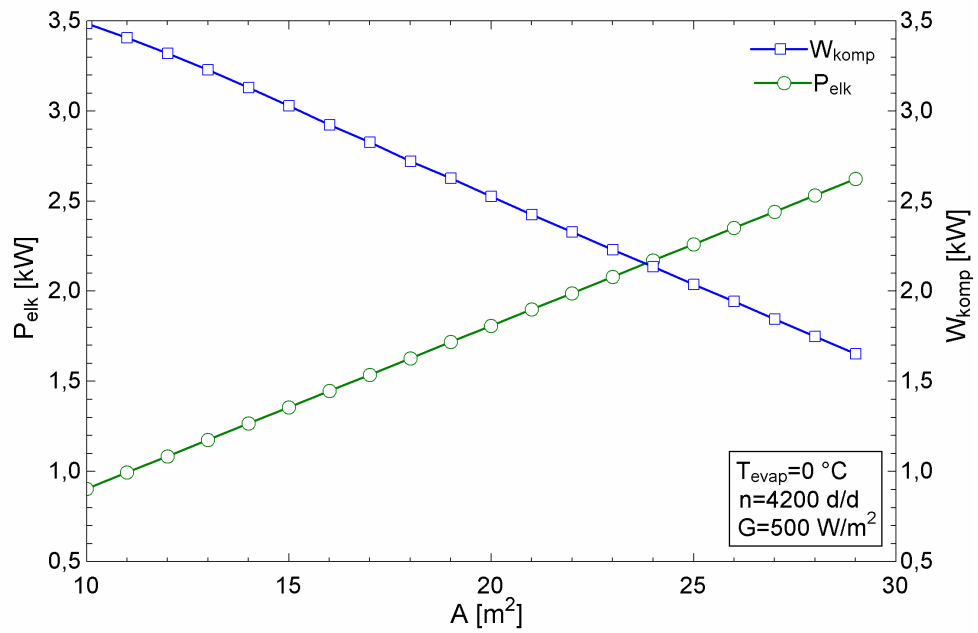
(c)



(d)

Şekil 4.4. (Devam ediyor) Alan ile (c) kompresör güç tüketimi ve kondenser sıcaklığı değişimi (d) COP_{IP} ısıtma değeri ve kondenser sıcaklığı değişimi

Alan artışı ile $G=500 \text{ W/m}^2$ ışıınım değeri ve evaporatör sıcaklığı $0 \text{ }^\circ\text{C}$ için sabit devirde, PVT' den elde edilen elektriksel gücün değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. PVT alanı artırıldığında, daha fazla güneş ışıını ve enerji toplanır. Bu, PVT panelin daha fazla elektrik üretebileceğı anlamına gelir çünkü daha fazla fotovoltaik hücre güneş ışıını yakalar. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere incelenen şartlarda ısı pompası kompresörünün tükettiğı gücü karşılayacak PVT alanı 24 m^2 olarak belirlenmiştir. Bu noktada üretilen elektrik 2154 W 'tır.



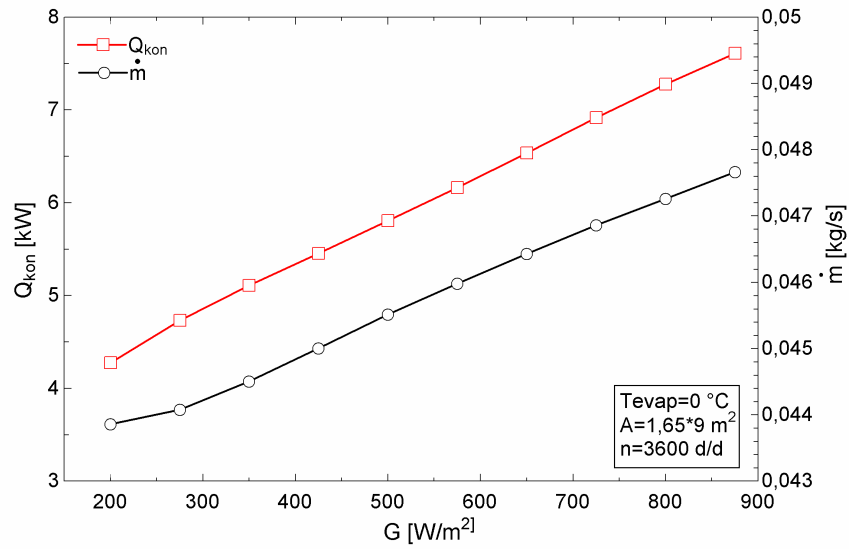
Şekil 4.5. PVT'li ısı pompası kompresör tüketim gücü ve elektrik üretiminin alan ile değişimi

4.2.2. Işıınım miktarının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi

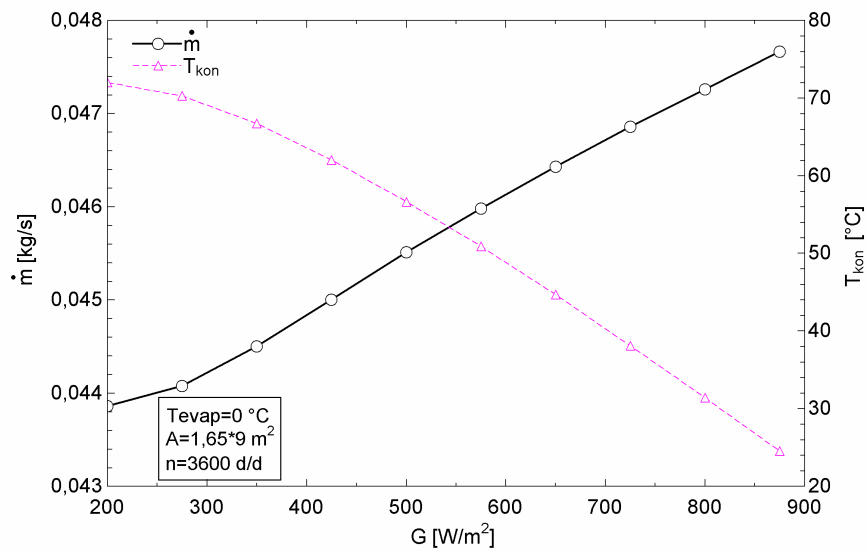
Işıınım miktarının kondenser ısıtma kapasitesi, akışkanın debisi, sistem için harcanan kompresör gücü, elektrik üretimi ve COP ısıtma değeri parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Şekil 4.6-a'da görüldüğü üzere ışıınım değeri arttıkça panelden çekilen ısııl enerji (Q_{pvt}) artar. Yani ısı pompasına verilen ısııl enerji (Q_{evap}) de artar. Isı pompasına verilen ısııl enerji arttıkça debi miktarı artar (Şekil 4.6-b). Bu sonuç sabit devirde çalışan ısı pompası/soğutma makinesi için beklenen bir durumdur. Böylelikle kondenser sıcaklığı,

kompresör tüketim gücü azalır (Şekil 4.6-c). Kondenserden atılan ısı güç ise (Q_{kon}) ise artar. Bu da bütünleşik sistemin COP ısıtma değerini yükseltir (Şekil 4.6-d). Evaporatör sıcaklığı 0°C , kompresör devri 3600 d/d iken ısıtım miktarı 200 W/m^2 'den 4 kat artırılarak 800 W/m^2 'ye çıkarıldığında, gerekli soğutucu akışkan debisi $0,04386\text{ kg/s}$ 'den $0,04726\text{ kg/s}$ 'ye, kondenser ısıtma kapasitesi $4,275\text{ kW}$ 'tan $7,277\text{ kW}$ 'a çıkmakta, kondenser sıcaklığı ise 72°C 'den $31,4^\circ\text{C}$ 'ye düşmektedir. Kompresörde tüketilen güç ise $3,114\text{ kW}$ 'tan $1,467\text{ kW}$ 'a azalmaktadır. Böylece COP_{IP} $1,373$ 'ten $4,96$ 'ya çıkmaktadır.

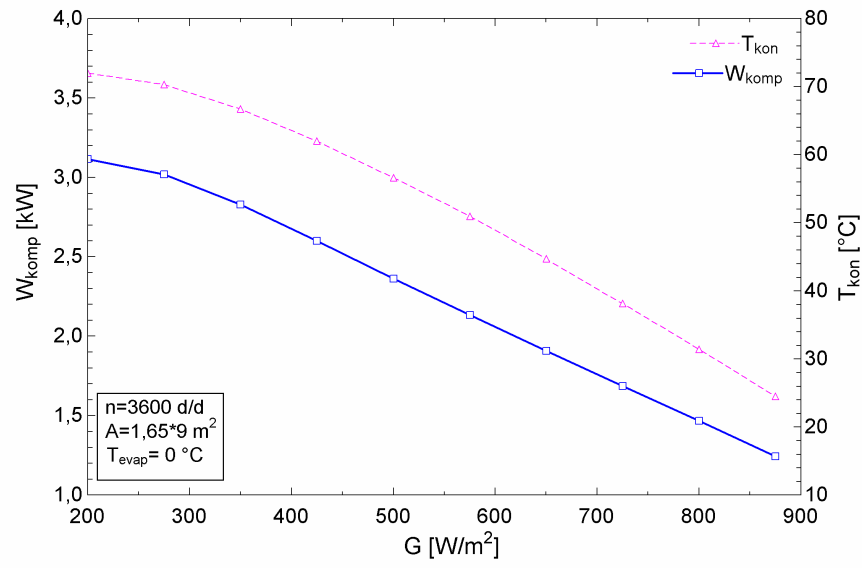


(a)

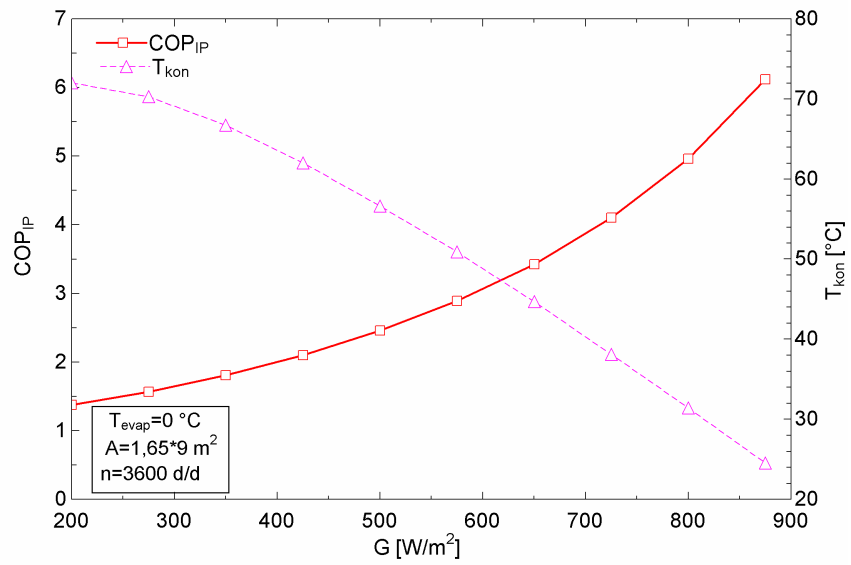


(b)

Şekil 4.6. Isıtım ile (a) kondenser kapasitesi ve debi değişimi (b) debi ve kondenser sıcaklığı değişimi



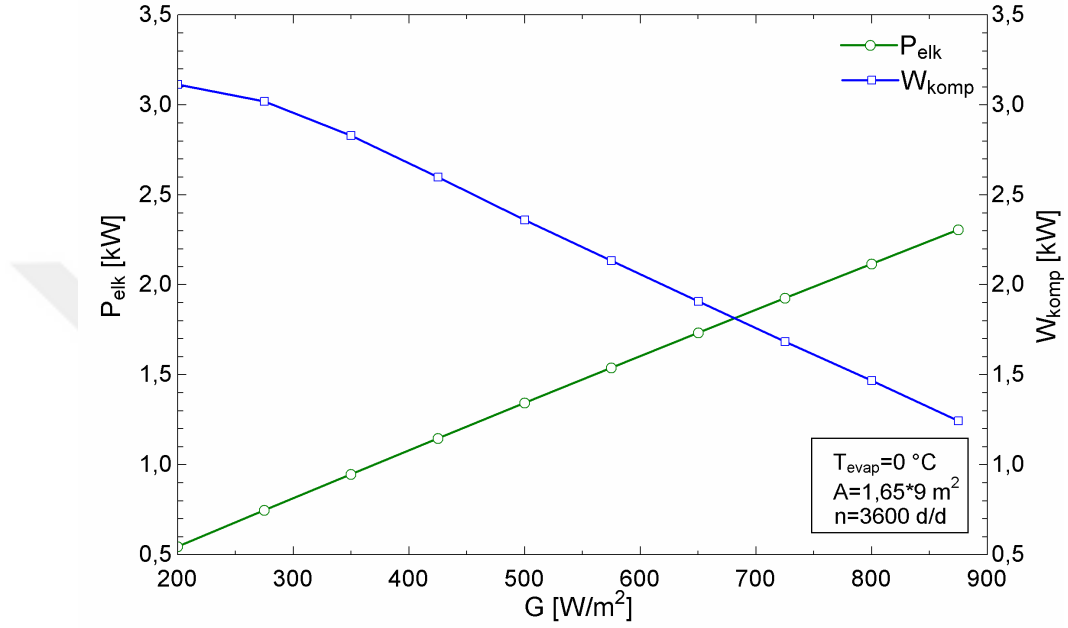
(c)



(d)

Şekil 4.6. (Devam ediyor) Işınım ile (c) harcanan kompresör gücü ve kondenser sıcaklığı değişimi (d) COP ısıtma değeri ve kondenser sıcaklığı değişimi

Işınım artışı ile sabit devirde, PVT alanı $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ ve sabit evaporatör sıcaklığında, PVT' den elde edilen elektriksel gücün değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. İncelenen şartlarda ısı pompası kompresörünün tükettiği gücü karşılayacak ısınım değeri 682 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu noktada üretilen elektrik 1815 W 'tır.

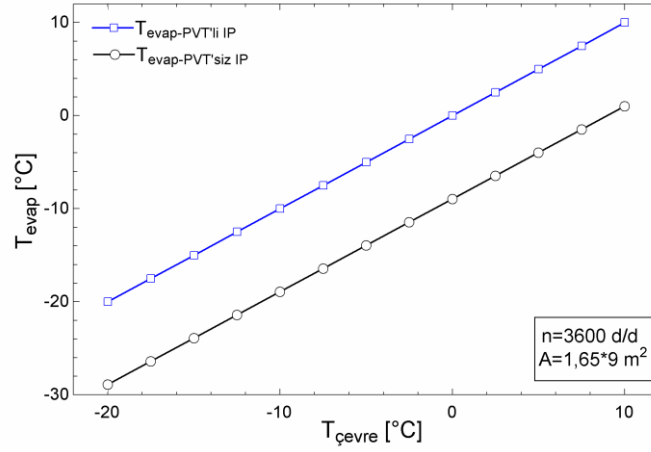


Şekil 4.7. PVT'li ısı pompası kompresör tüketim gücü ve elektrik üretiminin ısınım ile değişimi

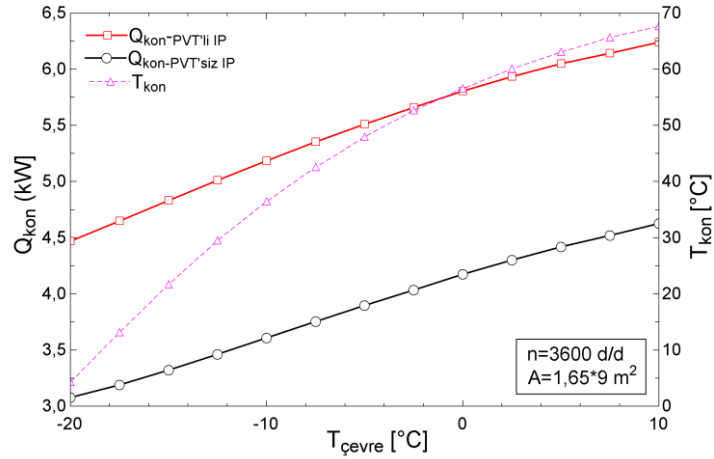
Alan ve ısınım miktarlarının artması, fotovoltaik termal panellerde elektrik üretimini artırır. Daha büyük bir alan, daha fazla güneş enerjisi yakalama ve bu enerjinin hem elektrik hem de ısı üretimine dönüştürülmesini sağlar. PVT paneline gelen daha çok ısınım miktarı da aynı şekilde PVT'nin daha fazla enerji yakalama kapasitesi olduğu anlamına gelmektedir. Bu yüzden alan ile ısınım değişimi grafikleri benzer sonuçlar vermektedir.

4.2.3. Çevre sıcaklığının PVT'li bütünleşik ve PVT'siz sistemin performans parametrelerine etkisi

Çevre sıcaklığı ile evaporatör sıcaklığı, PVT'li ve PVT'siz ısı pompası sisteminde kondenser kapasitesinin, akışkanın debisinin, sistem için harcanan kompresör gücünün, elektrik üretiminin ve *COP* ısıtma değerinin değişimi araştırılmıştır.

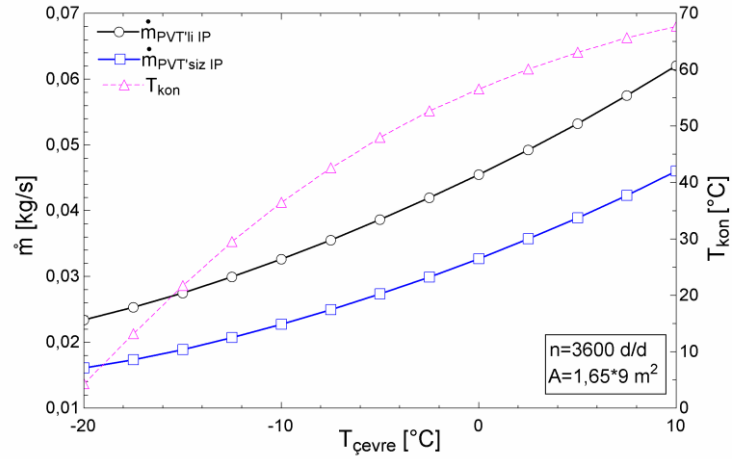


(a)

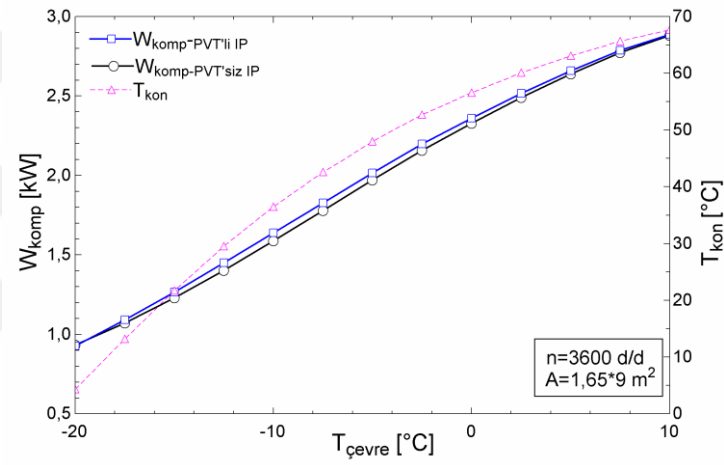


(b)

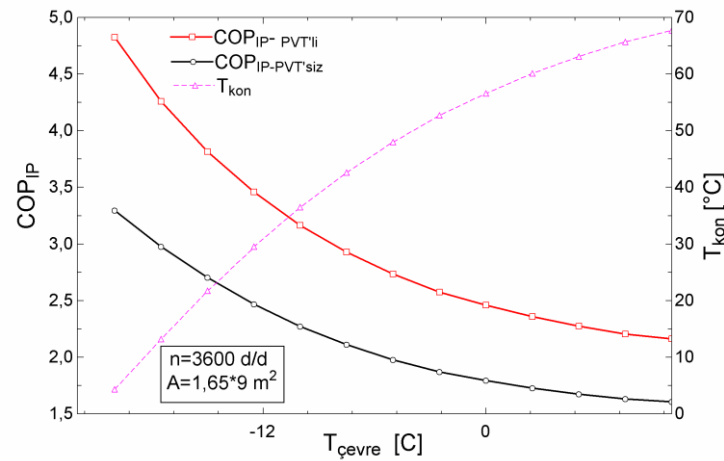
Şekil 4.8. Çevre sıcaklığı ile (a) evaporatör sıcaklıkları değişimi (b) kondenser kapasitesi ve kondenser sıcaklığı değişimi



(c)



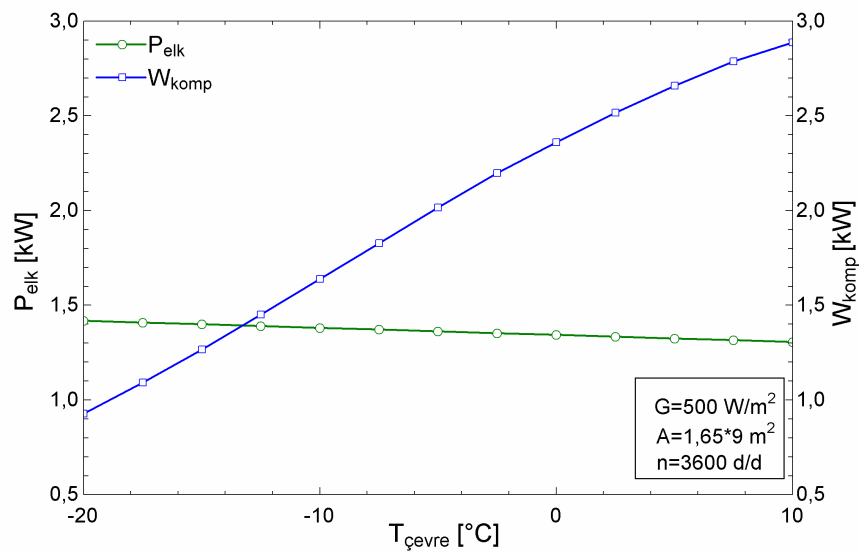
(d)



(e)

Şekil 4.8. (Devam ediyor) Çevre sıcaklığı ile (c) kondenser sıcaklığı ve debi değişimi (d) harcanan kompresör gücü ve kondenser sıcaklığı değişimi (e) COP ısıtma değeri ve kondenser sıcaklığı değişimi

Evaporatör sıcaklığı çevre sıcaklığı ile artar. Bu beklenen bir durumdur (Şekil 4.8-a). Burada PVT-Isı pompası bütünleşik sistemi için $T_{hücre}-T_{evap}=\Delta T_{PVT'li\ I.P.}$ değeri ile sadece ısı pompası sistemi için $T_{çevre}-T_{evap}=\Delta T_{PVT'siz\ I.P.}$ değeri eş değer alınarak inceleme yapılmıştır. Yani $T_{Isı\ kaynağı}-T_{evap}$ değeri her iki sistem için de aynı alınmıştır. Bu durum sabit ve değişken devirde kompresörlü ısı pompası ve PVT bütünleşik sistemlerinin her ikisi için de uygulanmıştır. Şekil 4.8-b'de görüldüğü üzere sabit hızlı bir kompresörde çevre sıcaklığı artışı ile evaporatör ve kondenser sıcaklığı da artar. Evaporatör sıcaklığının artışı kompresöre emilen soğutucu akışkanın özgül hacminin azalmasına ve Denklem (3.24)'e göre kütle debisinin ise artmasına sebep olur (Şekil 4.8-c). Debi artarken evaporatör kapasitesi (Q_{evap}) nispeten sabit kalmakta kondenser kapasitesi (Q_{kon}), kompresör tüketim gücü (W_{komp}) ve kondenser sıcaklığı (T_{kon}) artmaktadır (Şekil 4.8-d). Örneğin, PVT alanı $1,65 \times 9\ m^2$ ve ısınım miktarı $500\ W/m^2$ şartlarında, çevre sıcaklığı $-10\ ^\circ C$ ' den $0\ ^\circ C$ ' ye çıkarıldığında kondenser sıcaklığı $36,5\ ^\circ C$ ' den $56,6\ ^\circ C$ ' ye yükselmektedir. Bu şartlarda ısıtma kapasitesi PVT'li ısı pompası için $5,186\ kW$ 'tan $5,808\ kW$ 'a; PVT'siz ısı pompası ısıtma kapasitesi ise $3,609\ kW$ 'tan $4,177\ kW$ 'a çıkmıştır. Kompresör tüketim gücündeki artış ise PVT'li ve PVT'siz ısı pompası için hemen hemen aynıdır. Böylece PVT'li ısı pompası bütünleşik sistemin COP_{IP} değeri daha yüksek olmaktadır ve çevre sıcaklığı $0\ ^\circ C$ iken PVTli ısı pompası COP_{IP} değeri, PVT'siz ısı pompası COP_{IP} değerinden %27,03 daha yüksektir.



Şekil 4.9. PVT'li ısı pompası kompresör tüketim gücü ve elektrik üretiminin çevre sıcaklığı ile değişimi

Çevre sıcaklığı artışı ile sabit devirde, PVT alanı $1,65 \times 9 \text{ m}^2$, ısıtım miktarı 500 W/m^2 ve sabit evaporatör sıcaklığında ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), PVT' den elde edilen elektriksel gücün değişimi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. İncelenen şartlarda ısı pompası kompresörünün tükettiği gücü karşılayacak güç $-13,27 \text{ }^\circ\text{C}$ değerine kadar üretilmiştir. Bu noktada üretilen elektrik 1408 W 'tır. Bu noktadan sonra kompresör tüketim gücü elektrik üretim gücünü aşmıştır. Yüksek çevre sıcaklıkları, PV modüllerinin sıcaklık seviyelerini artırır ve bu da elektriksel verimliliği düşürür.

4.3. Değişken Devirde Çalışan Kompresörlü PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Termodinamik Analiz Sonuçları

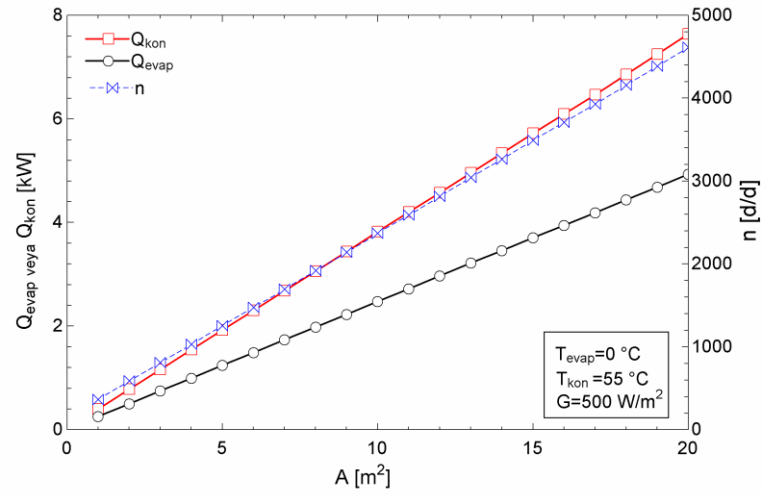
Bu bölümde değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası sisteminde kolektör alanı, ısıtım ve çevre sıcaklığının diğer performans parametrelerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bütünleşik sistemin ısı pompasında, değişken devirde çalışabilen 5 kW soğutma kapasiteli hermetik scroll kompresör (VLZ028TGA) kullanıldığı düşünülmüştür. Değişken devirde çalışan kompresörlü sistemde kondenser sıcaklığı $55 \text{ }^\circ\text{C}$ sabit olarak alındığı, devir sayısının ise bu sabit kondenser sıcaklığını sağlamak üzere değiştirildiği kabul edilmiştir. PVT çalışma şartları ve çevre sıcaklığına bağlı olarak evaporatör sıcaklığı değiştiğinde, öngörülen $55 \text{ }^\circ\text{C}$ kondenser sıcaklığını sağlamak üzere kompresör devir sayısının değişmesi gerektiğinden, kompresör devir sayısı parametresi de incelenmiştir.

4.3.1. Kolektör alanının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi

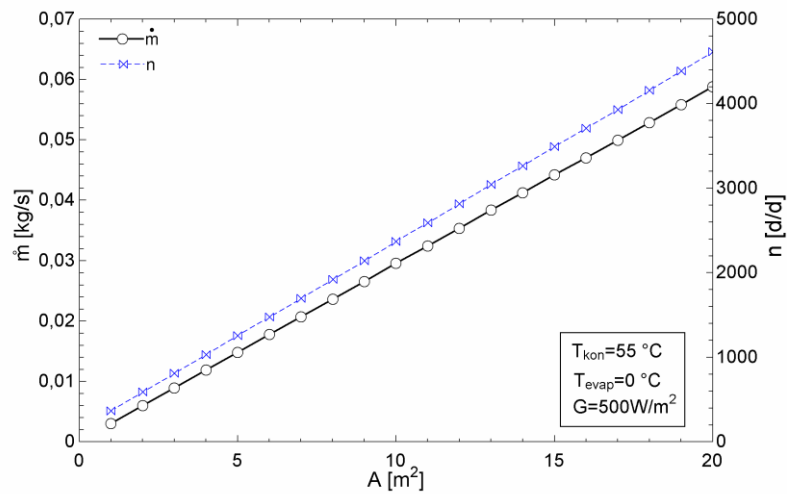
PVT kolektör alanının kondenser ve evaporatör kapasitesi, akışkanın debisi, sistem için harcanan kompresör gücü ve COP ısıma değeri parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Şekil 4.10-a' göre artan fotovoltaik-termal panel alanı ile PVT'den çekilen ısı enerjisi (Q_{pvt}) artar. Bununla birlikte ($Q_{pvt} = Q_{evap}$) alındığı için evaporatör kapasitesi (Q_{evap}) de artar. Kondenser sıcaklığı ve evaporatör sıcaklığı sabitken evaporatör kapasitesi arttıkça kütleli debi artar. Artan kütleli debiyi karşılamak için kompresör devir sayısı

artış gösterir (Şekil 4.10-b). Artan devir sayısı ve kütleli debi kondenserdan alınan ısı enerjisi ve kompresörde tüketilen gücün artmasına neden olur (Şekil 4.10-c). Kompresör devir sayısı artarken, kompresör tüketim gücü artışı ile kondenser gücü artışı ilişkisine bağlı olarak COP ısıtma değeri önce hızla artar, sonra hemen hemen sabit kalır (Şekil 4.10-d). Örneğin, ısıtım miktarı 500 W/m^2 iken kolektör alanı 8 m^2 'den 2 kat artırılarak 16 m^2 'ye çıkarıldığında soğutucu akışkan debisi $0,02363 \text{ kg/s}$ 'den $0,04706 \text{ kg/s}$ 'ye, ısıtma kapasitesi $3,06 \text{ kW}$ 'tan $6,092 \text{ kW}$ 'a, kompresör tüketim gücü ise $1,255 \text{ kW}$ 'tan $2,368 \text{ kW}$ 'a artmaktadır. Bu esnada kompresör devri 1920 d/d 'dan 3708 d/d 'ya çıkmaktadır. Bu durumda COP_{IP} değeri $2,437$ 'den $2,573$ 'e ulaşarak $\% 5,58$ artmıştır.

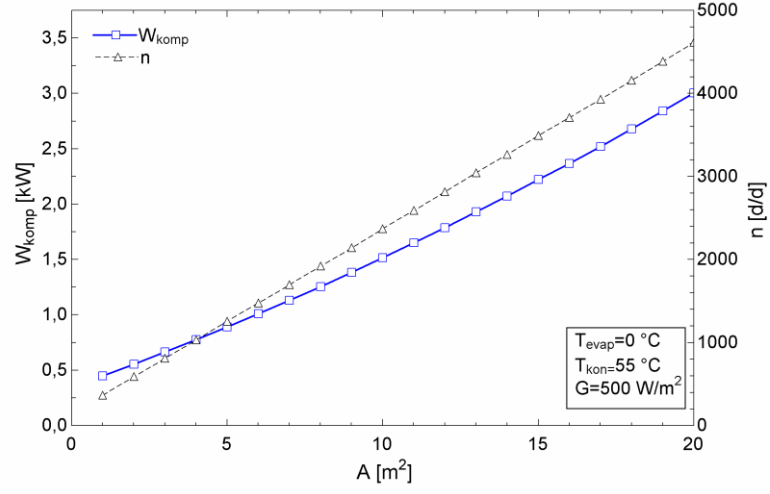


(a)

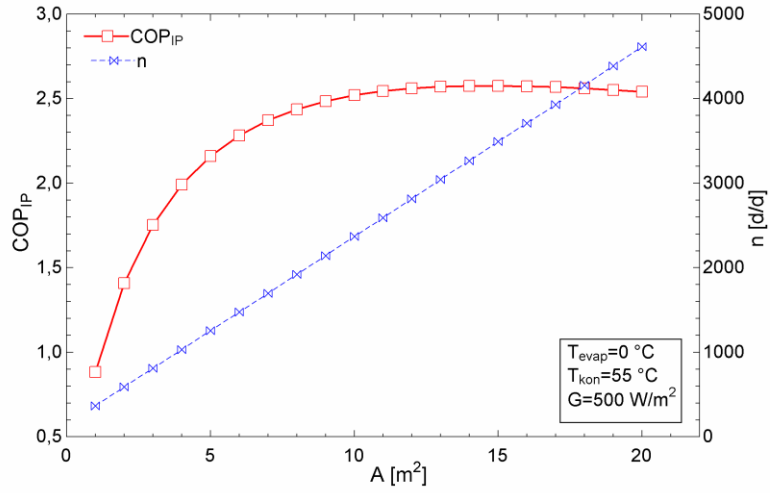


(b)

Şekil 4.10. PVT alanı ile (a) kondenser-evaporatör kapasitesi ve devir sayısı değişimi (b) debi ve devir sayısı değişimi



(c)

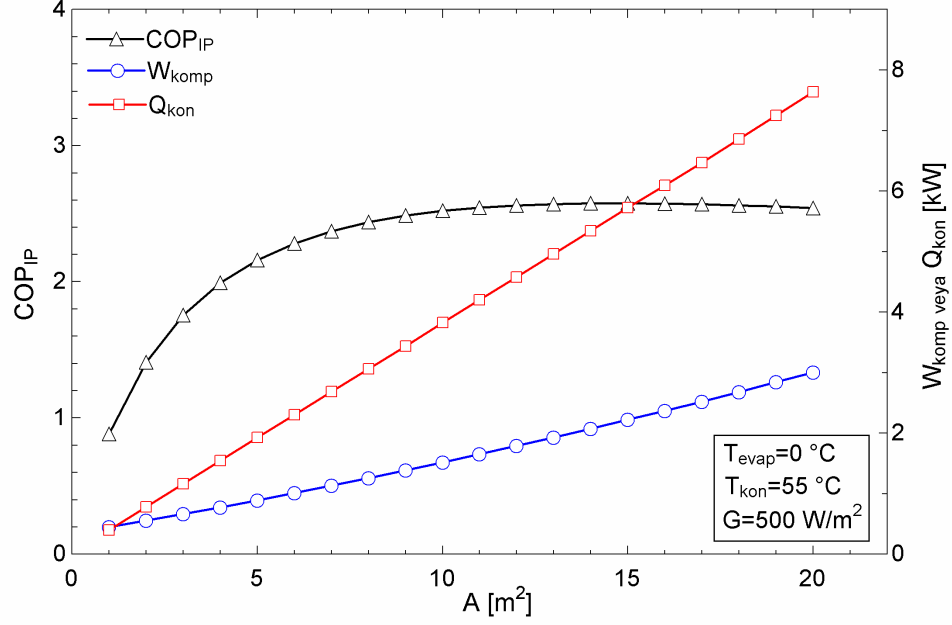


(d)

Şekil 4.10. (Devam ediyor) PVT alanı ile (c) harcanan kompresör gücü ve devir sayısı değişimi (d) COP ısıtma değeri ve devir sayısı değişimi

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere PVT’li ısı pompası kompresör tüketim ve kondenser gücünün değişiminin COP üzerindeki etkisi görülmektedir. Işınım miktarı 500 W/m^2 iken panel alanı 5 m^2 ’ye kadar artırıldığında COP_{IP} hızla artmakta ve 5 m^2 ile 15 m^2 arasında COP_{IP} değerinin artış oranı yavaşlamakta 15 m^2 ’den sonra hemen hemen sabit kalmaktadır. 15 m^2 ’ye kadar kondenser kapasitesi artışının kompresör tüketim gücü artışından daha fazla olması sebebiyle COP_{IP} artış göstermekte, bu noktadan sonra ise

panel alanı artmasına rağmen COP_{IP} hemen hemen sabit kalmaktadır. PVT panel alanı $1\text{ m}^2, 5\text{ m}^2, 10\text{ m}^2$ ve 15 m^2 de COP_{IP} değeri sırasıyla $0,88$, $2,16$, $2,52$ ve $2,57$ olmaktadır.

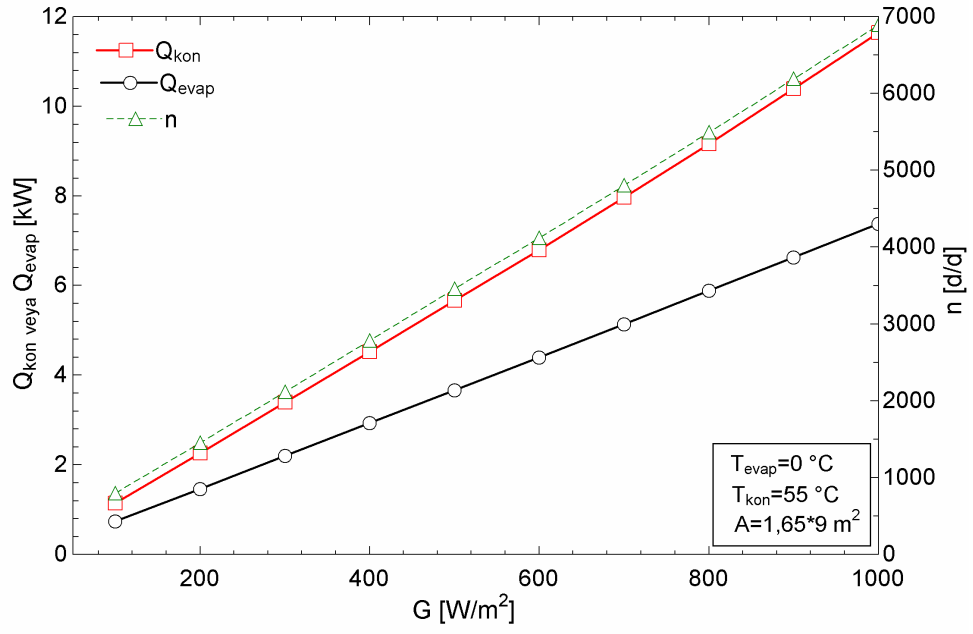


Şekil 4.11. PVT'li ısı pompası kompresör tüketimi ve kondenser gücü değişiminin COP üzerindeki etkisi

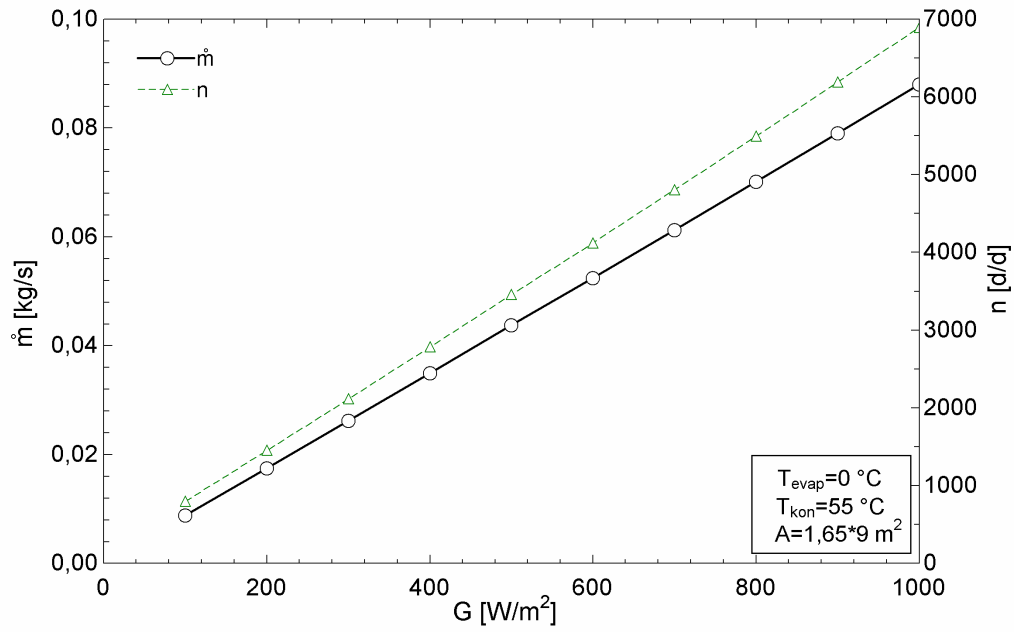
4.3.2. Işınım miktarının bütünleşik sistem performans parametrelerine etkisi

Işınım miktarının kondenser ısıtma kapasitesi, akışkanın debisi, sistem için harcanan kompresör gücü ve COP ısıtma değeri parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de sunulmuştur.

Şekil 4.12'ye göre kondenser sıcaklığı ve evaporatör sıcaklığı sabitken ışınlam artışı ile PVT' den çekilen ısı enerjisi (Q_{pvt}) beklendiği gibi artmaktadır. Böylelikle ısı pompası sistemindeki Q_{evap} de artar ve buna bağlı olarak kütleli debi de artar. Artan debiyi karşılamak için devir sayısı artması gerekir. Böylece artan devir sayısı ve debinin sonucunda kompresör tüketim gücü ve kondenser kapasitesi artar. Alan analizinde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar ışınlam için de elde edilmiştir.

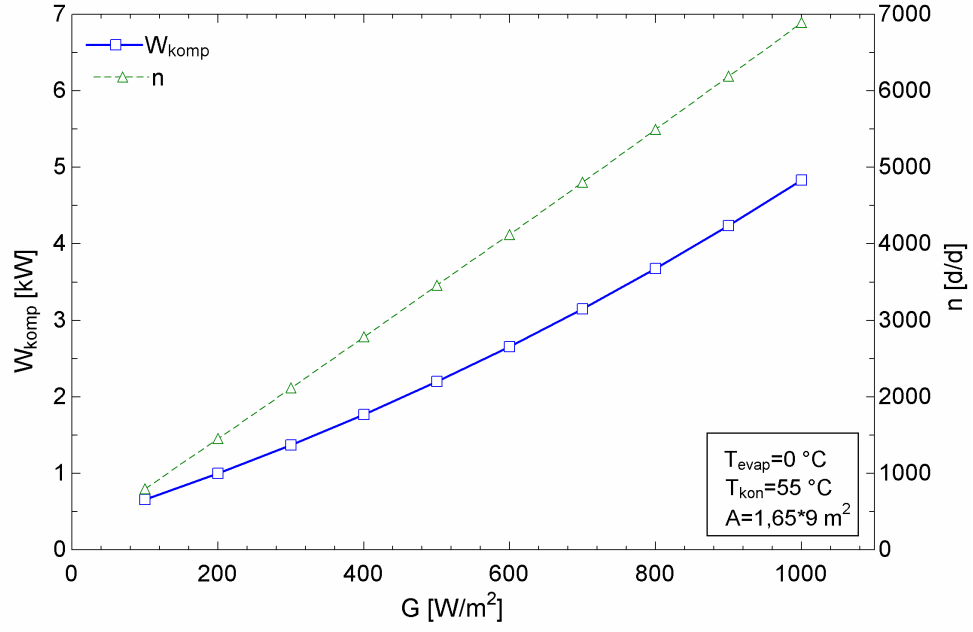


(a)

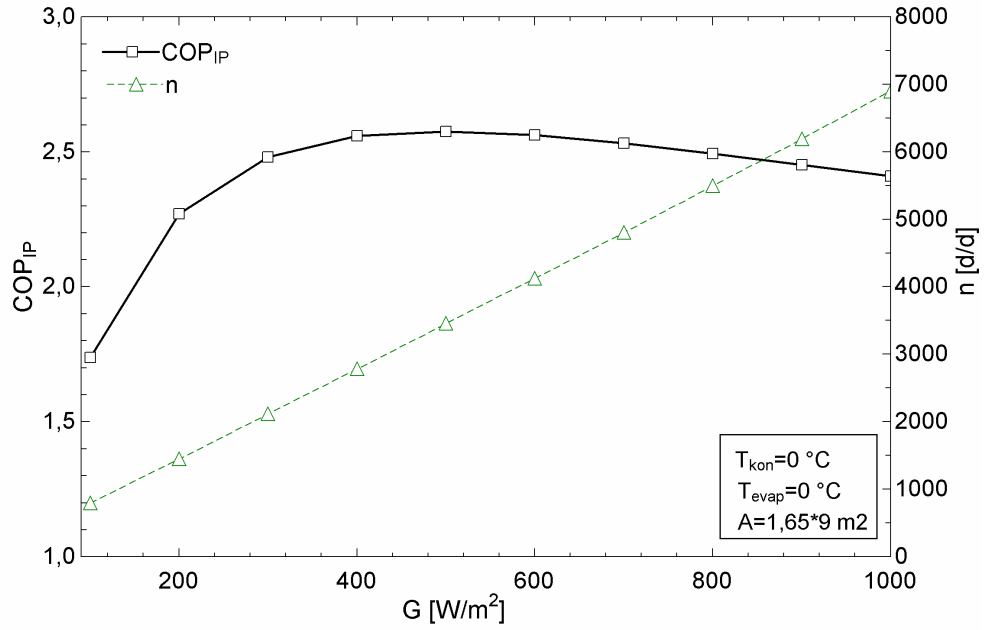


(b)

Şekil 4.12. Işınım ile (a) kondenser-evaporatör kapasitesi ve devir sayısı değişimi (b) debi ve devir sayısı değişimi



(c)

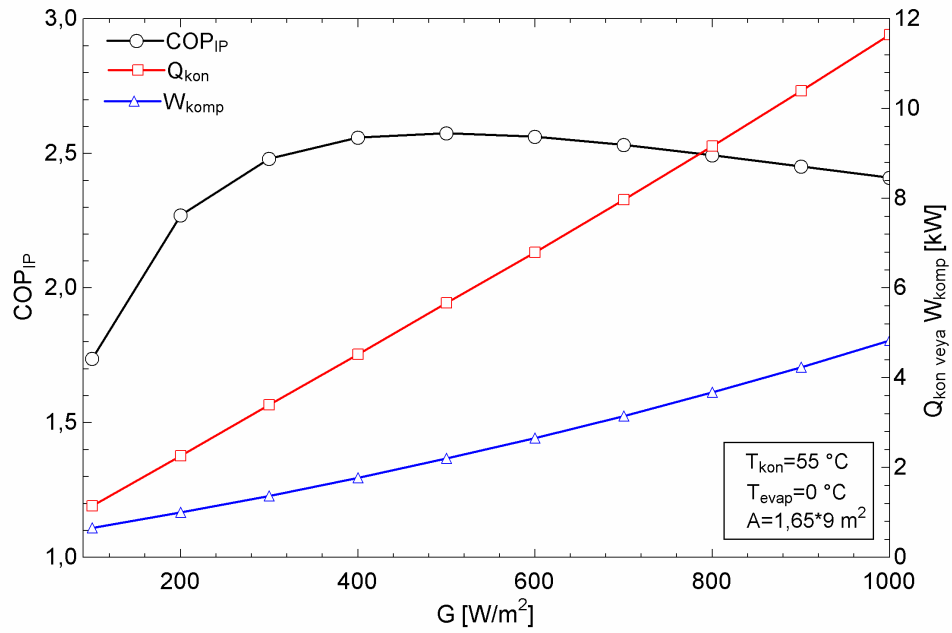


(d)

Şekil 4.12. (Devam ediyor) Işınım ile (c) harcanan kompresör gücü ve devir sayısı değişimi (d) COP ısıtma değeri ve devir sayısı değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere COP ısıtma eğrisi üzerinde kompresör tüketim ve kondenser gücünün etkisi görülmektedir. Panel alanı $1,65 \times 9\text{ m}^2$ iken, ısıtım

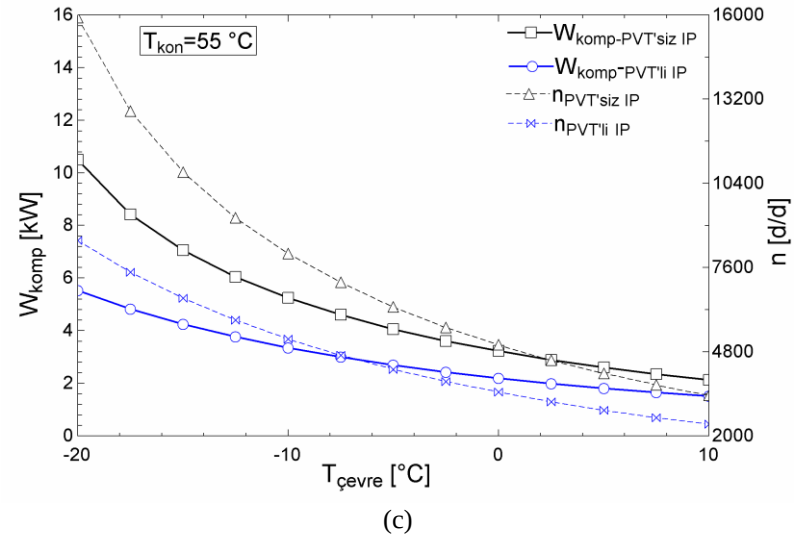
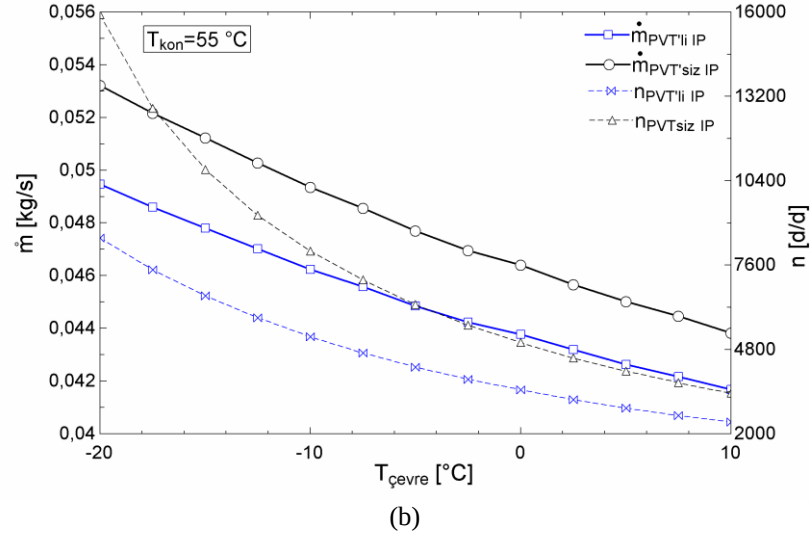
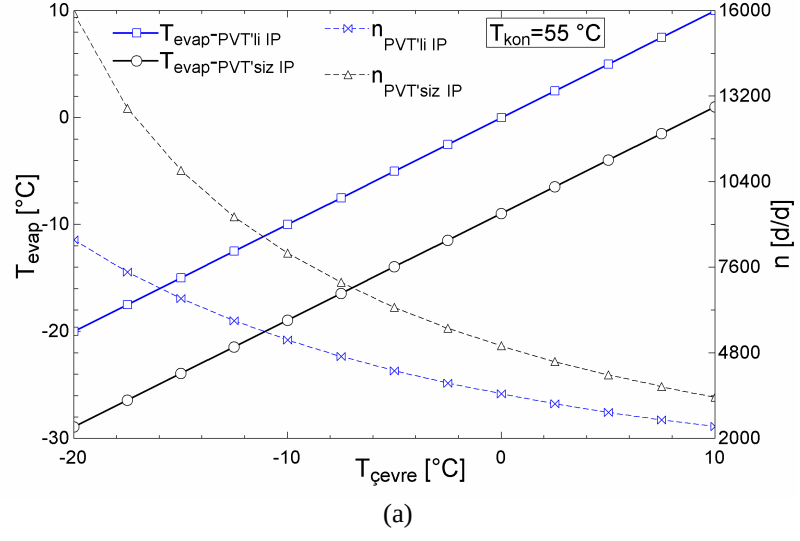
miktarı 300 W/m^2 'ye kadar artırıldığında COP_{IP} hızla artmakta ve 300 W/m^2 ile 500 W/m^2 arasında COP_{IP} değerinin artış oranı yavaşlamakta, 500 W/m^2 ile 1000 W/m^2 arasında ise hafifçe düşmektedir. Bu şartlar altında ısıtım miktarı 500 W/m^2 den daha yüksek olduğunda kompresör tüketim gücündeki artış oranı kondenser kapasitesindeki artış oranından daha fazla olması sebebiyle COP_{IP} hafifçe azalmaktadır. Isıtım miktarı 100 W/m^2 , 300 W/m^2 , 500 W/m^2 ve 1000 W/m^2 'de COP_{IP} değeri sırasıyla 1,73 , 2,48 , 2,57 ve 2,40 olmaktadır.



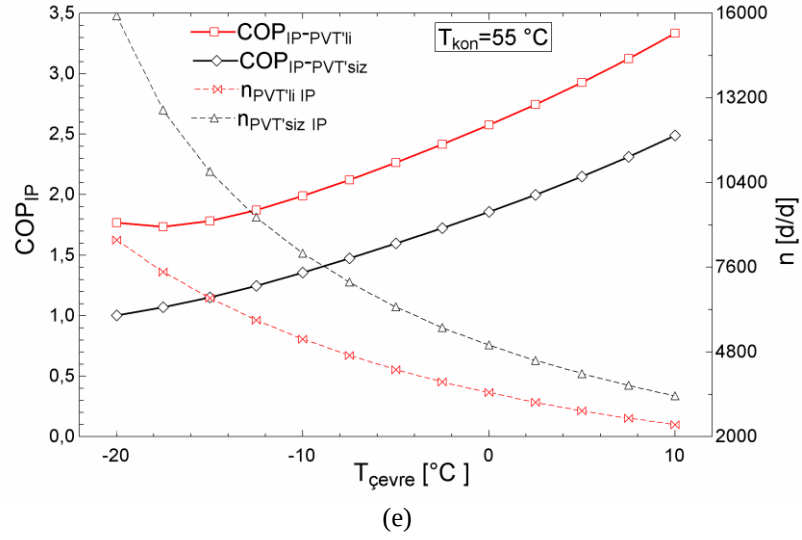
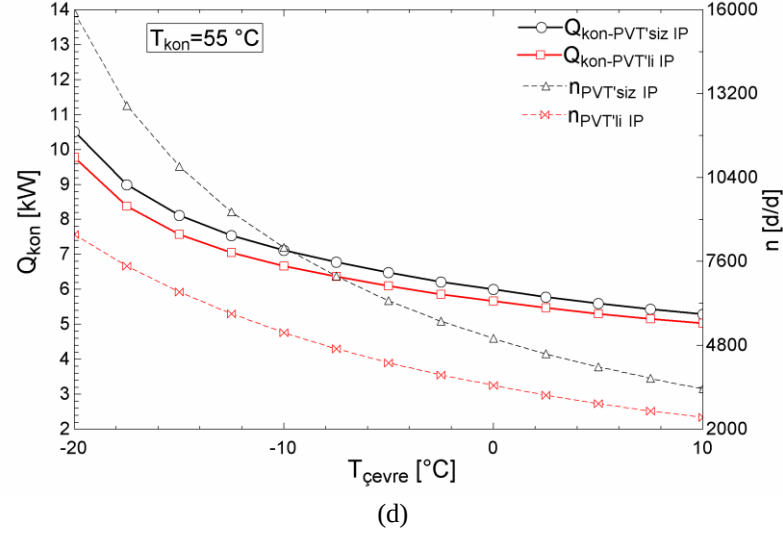
Şekil 4.13. PVT'li ısı pompası kompresör tüketimi ve kondenser gücü değişiminin COP üzerindeki etkisi

4.3.3. Çevre sıcaklığının PVT'li ve PVT'siz sistemin performans parametrelerine etkisi

Çevre sıcaklığı ile evaporatör sıcaklığı, PVT'li ve PVT'siz ısı pompası sisteminde kondenser kapasitesinin, akışkanın debisinin, sistem için harcanan kompresör gücünün ve COP ısıtma değerinin değişimi araştırılmıştır.



Şekil 4.14. Çevre sıcaklığı ile (a) evaporatör sıcaklıkları ve devir sayısı değişimi (b) debi ve devir sayısı değişimi (c) harcanan kompresör gücü ve devir sayısı değişimi

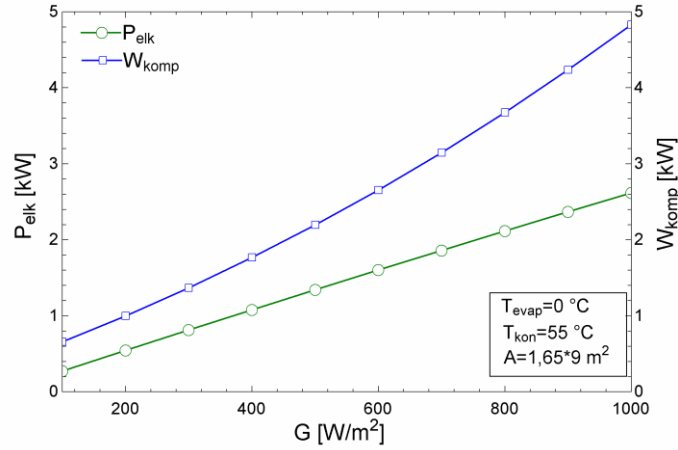


Şekil 4.14. (Devam ediyor) Çevre sıcaklığı ile (d) kondenser kapasitesi ve devir sayısı değişimi (e) COP ısıtma değeri ve devir sayısı değişimi

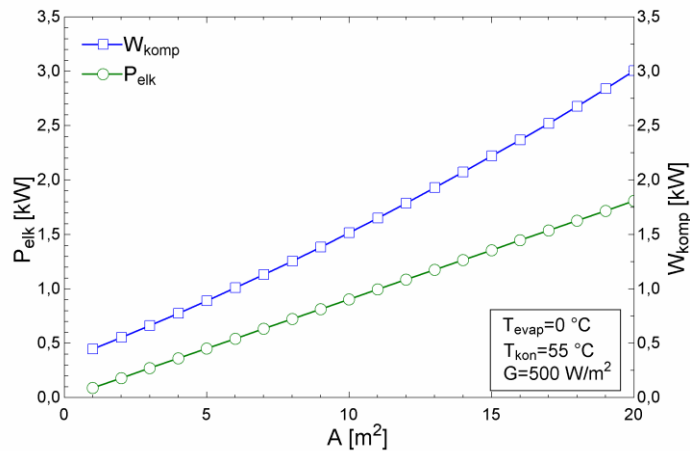
Şekil 4.14-a'ya göre kondenser sıcaklığı 55°C 'de sabitken çevre sıcaklığı ile evaporatör sıcaklığı artmaktadır. $T_{kon}-T_{evap}$ sıcaklık farkı ve P_{kon}/P_{evap} basınç oranı düştüğü için daha düşük devir sayısı (n) yeterli olmaktadır (Şekil 4.14-b). Daha düşük devir sayısı daha düşük debiye, daha düşük kompresör gücüne ve daha düşük kondenser gücüne neden olmaktadır (Şekil 4.14-c ve d). Sabit kondenser sıcaklığı ve sabit alanda ($1,65 \times 9 \text{ m}^2$) -20°C 'den 10°C 'ye çıkarıldığında kompresör gücü PVT'li ısı pompası sisteminde %72,74 ,PVT'siz ısı pompası sisteminde %79,76 düşer. Kondenser gücü ise PVT'li sistemde %48,54 PVT'siz sistemde %49,80 düştüğü için Denklem (3.19)'a uygun olarak COP ısıtma değeri artmaktadır. Ayrıca, PVT panel alanı $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ ve ışınlım

miktarı 500 W/m^2 , çevre sıcaklığı 0°C ve kondenser sıcaklığı 55°C şartlarında PVT'siz ısı pompası için kompresör tüketim gücü %31,94 daha yüksektir. PVT'li ısı pompalı sistemin COP_{IP} değeri, PVT'siz ısı pompalı sisteminkinden %27,87 daha yüksektir.

Şekil 4.15-a'da ışıınım artışı ile PVT' den elde edilen elektriksel gücün değişimi gösterilmiştir. Işıınım miktarı arttıkça çekilen ısııl enerji miktarı (Q_{PVT}) ve elektrik üretimi (P_{elk}) artmaktadır. Isıl enerji miktarının artması evaporatör gücünü artırmış ($Q_{PVT}=Q_{evap}$) ve buna bağlı olarak soğutucu akışkan kütsel debisi artmıştır. Artan debiyi karşılamak için devir sayısının artması gerekir. Böylece artan devir sayısı ve kütsel debisinin sonucunda kompresör tüketim gücü artar. Şekil 4.15-b'de PVT alanı artışı ile PVT' den elde edilen elektriksel gücün değişimi incelenmiştir. Işıınım analizinde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar PVT alanı için de elde edilmiştir.

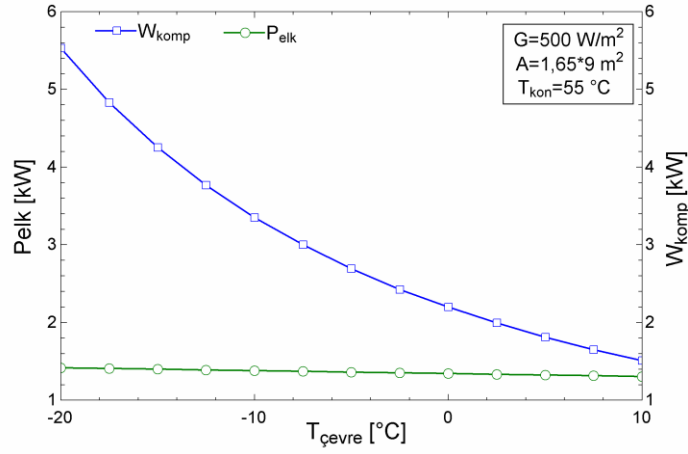


(a)



(b)

Şekil 4.15. PVT'li ısı pompası kompresör tüketim ve elektrik üretim gücünün (a) ışıınım ile (b) PVT alan ile değişimi



(c)

Şekil 4.15. (Devam ediyor) PVT’li ısı pompası kompresör tüketim ve elektrik üretim gücünün (c) çevre sıcaklığı ile değişimi

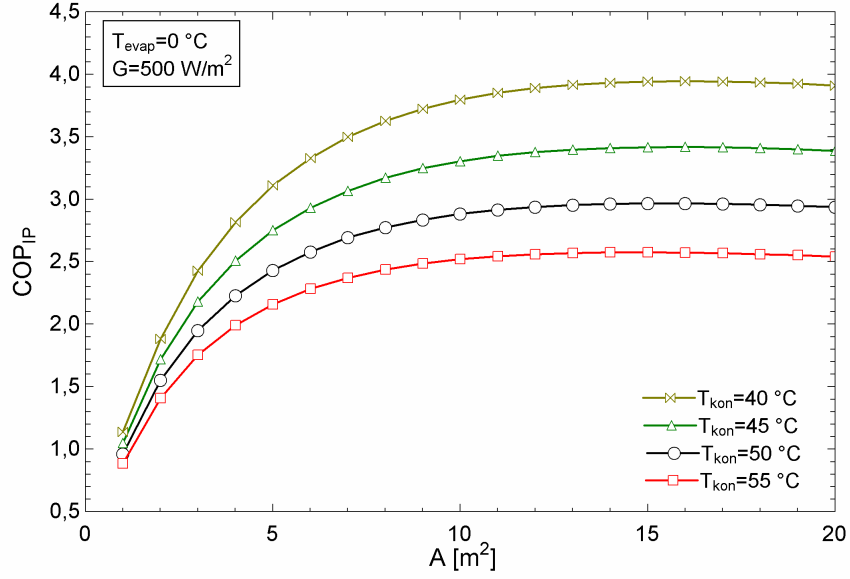
Şekil 4.15-c’ye göre çevre sıcaklığı arttığında ise üretilen ısıl enerji miktarı artmakta ancak PV panel hücre sıcaklığı arttığından üretilen elektriksel güç düşmektedir. Çevre sıcaklığı arttıkça $T_{\text{kon}}-T_{\text{evap}}$ sıcaklık farkı ve $P_{\text{kon}}/P_{\text{evap}}$ basınç oranı düştüğü için daha düşük devir sayısı (n) yeterli olmaktadır. Daha düşük devir sayısı daha düşük debiye ve daha düşük kompresör gücüne neden olmaktadır.

4.3.4. Değişken devirde çalışan kompresörlü PVT’li bütünleşik sistemde kondenser sıcaklığının COP üzerindeki etkisi

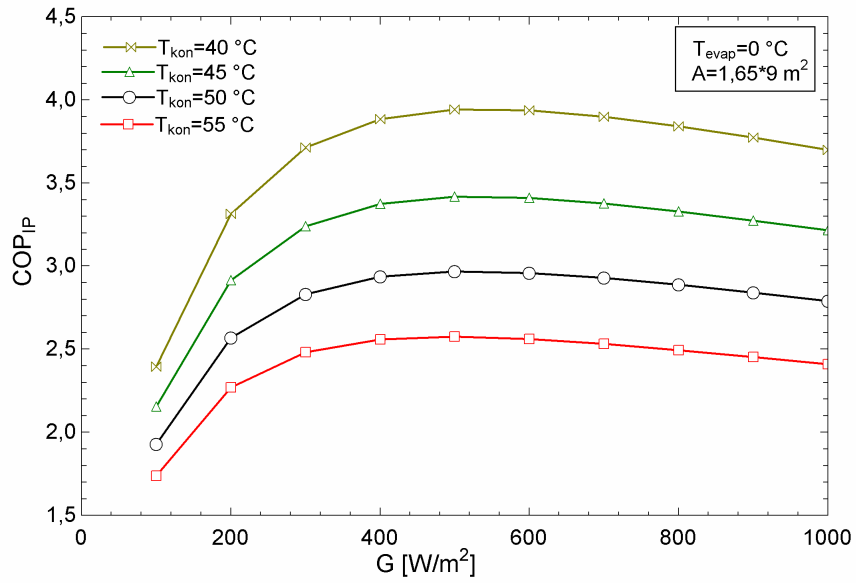
Değişken devirde çalışan kompresörlü sistemde kondenser sıcaklığının 55°C ve sabit olarak alındığı, devir sayısının ise bu sabit kondenser sıcaklığını sağlamak üzere değiştirildiği kabul edilmişti. Sabit olarak kabul edilen bu kondenser sıcaklığının, 55°C ’den farklı sabit bir kondenser sıcaklığında olması durumunda, sistemin COP değerinin nasıl değişeceği araştırılmıştır.

Şekil 4.16’da değişken devir sayılı kompresörlü ısı pompası bütünleşik sisteminde farklı kondenser sıcaklıklarında PVT alanı, ısıtım miktarı ve çevre sıcaklığına bağlı olarak COP ’un değişimi araştırılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.16’da sunulmuştur. Şekil 4.16’ya göre diğer parametreler sabitken kondenser sıcaklığı arttıkça COP_{IP}

beklenildiği gibi düşmektedir. Şekil 4.16'ya göre kondenser sıcaklığı 40°C iken en yüksek COP değeri, kondenser sıcaklığı 55°C iken de en düşük COP_{IP} değeri elde edilmiştir. Örneğin; PVT panel alanı 10 m^2 , ışıınım miktarı 500 W/m^2 , çevre sıcaklığı 0°C iken kondenser sıcaklığı 55°C 'den 40°C 'ye düştüğünde COP_{IP} 2,52'den 3,78'e çıkmaktadır.

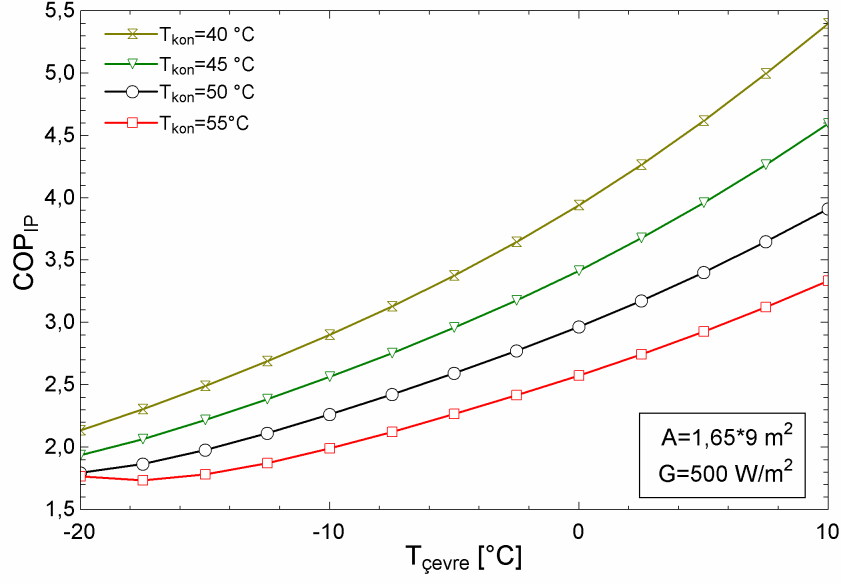


(a)



(b)

Şekil 4.16. PVT'li değişken devir sayılı ısı pompasının farklı kondenser sıcaklıklarında COP değeri değişimi (a) alana göre; (b) ışıınıma göre



(c)

Şekil 4.16. (Devam ediyor) PVT’li değişken devir sayılı ısı pompasının farklı kondenser sıcaklıklarında COP değeri değişimi (c) çevre sıcaklığına göre

4.4. Antalya İli İçin PVT’li Bütünleşik ve PVT’siz Isı Pompası Sistemlerinin Aylık COP Değişimleri

Bu bölümde sabit veya değişken devirde çalışan kompresörlü PVT’li ve PVT’siz bir ısı pompası sisteminin Antalya’da kurulması durumunda Antalya ilinin 2022 yılı dış ortam sıcaklık ve ısıtım değerleri kullanılarak, ısıtma (Ekim-Mart) ve soğutma (Nisan-Eylül) sezonları için, aylık bazda gündüz saatlerinde (dinamik) termal performansı analiz edilmiştir.

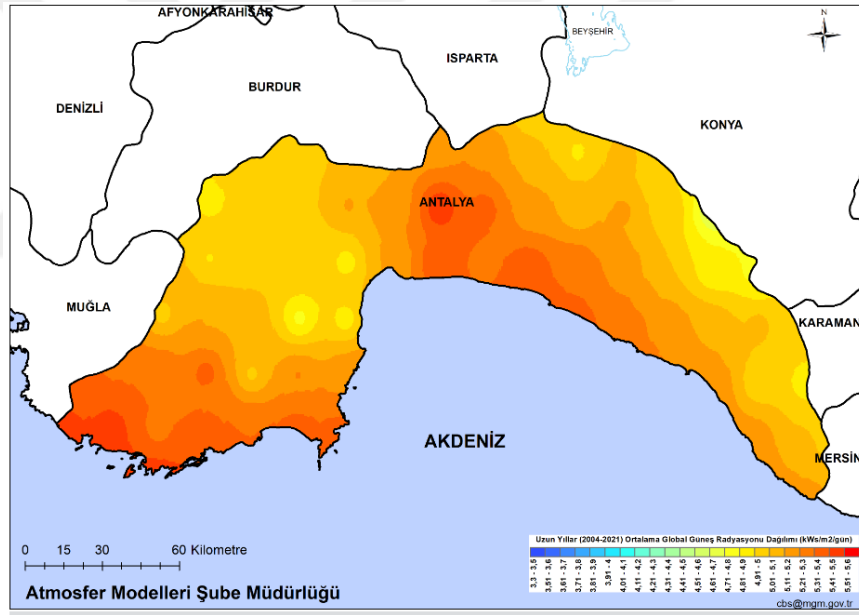
Antalya ili için 2022 yılı saatlik olarak sıcaklık ve ısıtım değerlerinin ay içerisindeki ortalama değerleri “Photovoltaic Geographical Information System”den (Anonim-5) alınmıştır. Isıtma (Ekim-Mart) ve soğutma (Nisan-Eylül) sezonları için öngörülen PVT’li ısı pompası bütünleşik sistemin ve PVT’siz sistemin termal performansı analiz edilmiştir.

Isı pompası sisteminde 5 kW soğutma kapasiteli, sabit veya değişken devirde çalışabilen, R404A soğutucu akışkanlı hermetik scroll kompresör (VLZ028TGA) kullanıldığı düşünülmüştür. PVT alanı 1.65x9 m² olarak alınmıştır.

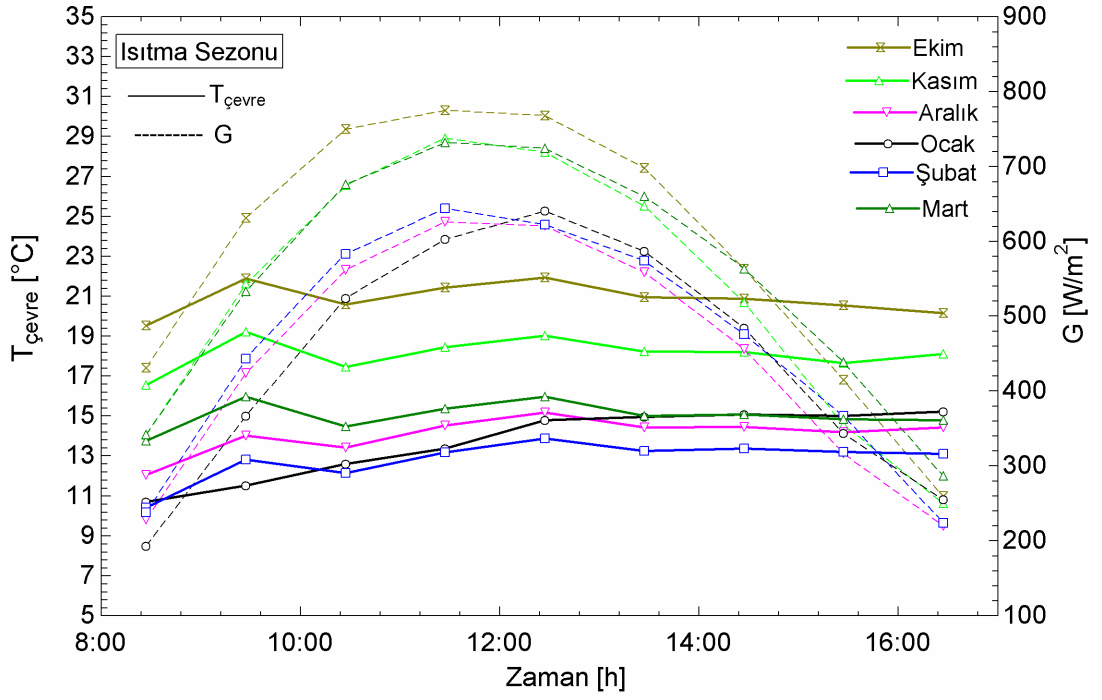
4.4.1. Antalya İli İçin PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Isıtma Sezonu Aylık COP Değişimleri

Isı pompası kompresörünün; 1800 d/d sabit devirde çalışması durumunda, sistemin PVT çalışma şartları ve/veya çevre sıcaklığına bağlı olarak evaporatör sıcaklığı değiştiğinde kondenser sıcaklığının da değişmesi gerektiği, değişken devirde çalışması durumunda ise kondenser sıcaklığının 55 °C sabit olarak alındığı ve devir sayısının da bu sabit kondenser sıcaklığını sağlamak üzere değiştirildiği kabul edilmiştir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistem yıl boyunca kullanılacağı için Duffie ve Beckman'ın (1980) önerisine uygun şekilde kolektör eğim açısı (β), enlem açısına (Φ) eşit ($\beta = \Phi$) ve Antalya ilinin enlem açısı 36° olarak alınmıştır.

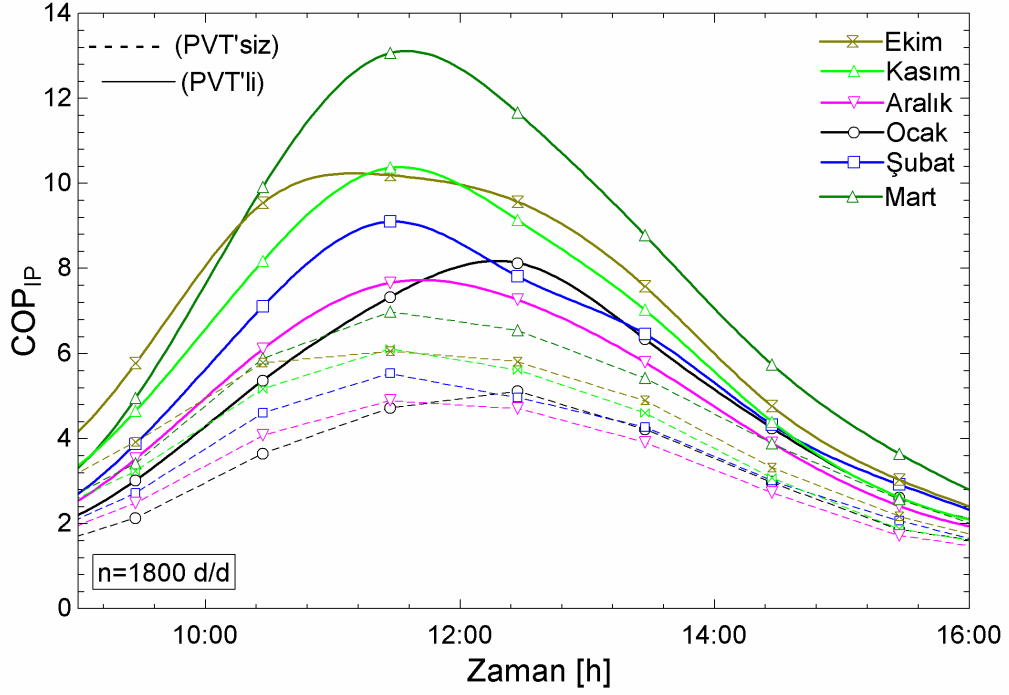


Şekil 4.17. Antalya ili radyasyon ortalaması (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü)



Şekil 4.18. Antalya ili ısıtma sezonu, (Ekim-Mart) ayları boyunca saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerleri

Antalya ili ısıtma sezonu, (Ekim-Mart) ayları, saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerleri 2022 yılı için (Anonim-5)'den alınıp düzenlenerek Şekil 4.18'de sunulmuştur. Buna göre ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) ayları gündüz saatlerinde, en yüksek sıcaklığın Ekim ayında saat 12.45'te ortalama $21,93^{\circ}\text{C}$ olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.18'e göre aylık ortalama sıcaklık değerlerinin gündüz saatlerinde çok değişmediği, gündüz saatlerindeki en çok sıcaklık değişiminin ocak ayında ve $4,51^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Antalya ili ısıtma sezonu (Ekim-Mart) ayları gündüz saatlerinde, en yüksek ısıtımın Ekim ayında saat 11.45'te ve ortalama 768 W/m^2 olduğu belirlenmiştir.

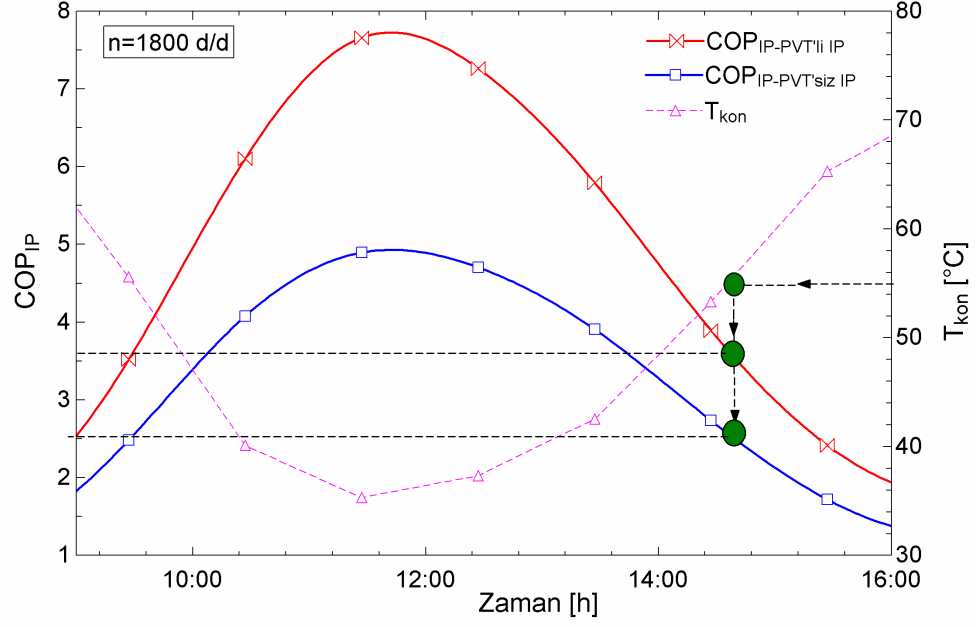


Şekil 4.19. Sabit devirli kompresör ile çalışan PVT'siz ve PVT'li ısı pompası bütünleşik sisteminin Antalya ili COP ısıtma değerleri

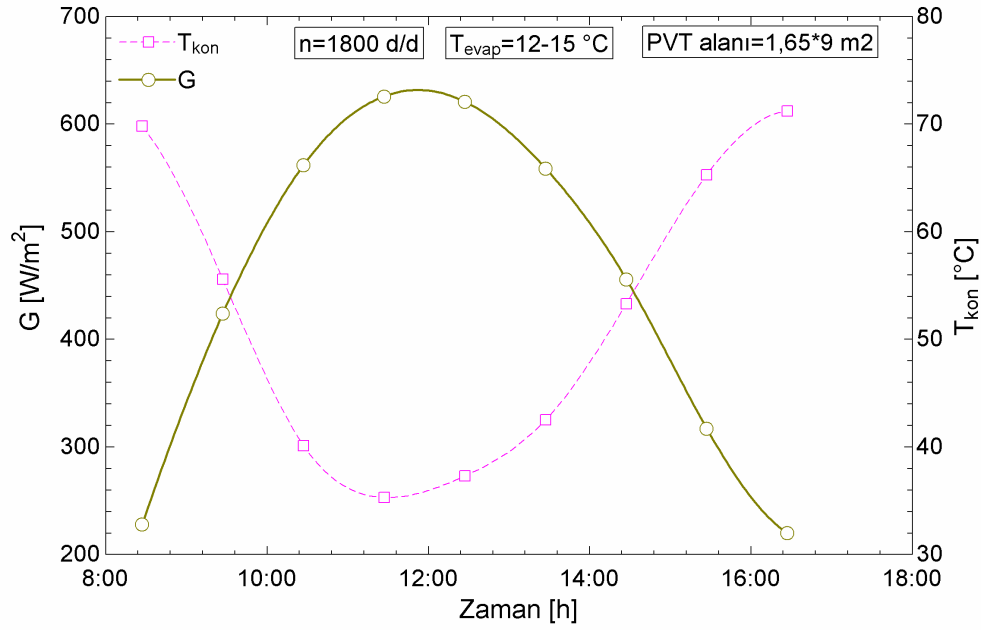
Şekil 4.19'da Antalya ilinde kurulduğu düşünülen, sabit devirli kompresör ile çalışan PVT'siz ve $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ PVT'li ısı pompası bütünleşik sisteminin COP ısıtma değerleri saatlik olarak sıcaklık ve ışıının ay içerisindeki ortalama değerleri dikkate alınarak ısıtma sezonu (Ekim-Mart) ayları için karşılaştırılmıştır. PVT'li ve PVT'siz sabit devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için, PVT'li sistemin COP_{IP} değerleri PVT'siz sistemin COP_{IP} değerlerine göre daha yüksektir. PVT'li ve PVT'siz sabit devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için, devir sayısı 1800 d/d , $T_{\text{evap-PVT'li}} = T_{\text{çevre}}$ ve $T_{\text{evap-PVT'siz}} = T_{\text{çevre}} - 10 \text{ }^\circ\text{C}$ alınmıştır. Bu şartlarda sabit devirli kompresörlü bütünleşik sistemin ortalama COP 'u (5,470), PVT'siz ısı pompasının ortalama COP 'una (3,533) göre %54,82 daha verimli olduğu görülmüştür.

İşınım değerlerine bağlı olarak, Mart ayında elde edilen PVT'li ve PVT'siz sabit devirli ısı pompası COP_{IP} değerlerinin diğer aylara göre daha yüksek olduğu en düşük COP_{IP} değerlerinin ise Ocak ayında olduğu görülmüştür. Mart ayında saat 12:45'te PVT'li ısı pompası COP_{IP} değeri 11,66 iken, PVT'siz ısı pompası COP_{IP} değeri 6,54'tür.

Ocak ayında ise saat 12:45'te ise PVT'li ısı pompası COP_{IP} değeri 8,13 iken, PVT'siz ısı pompası COP_{IP} değeri 5,12'dir.

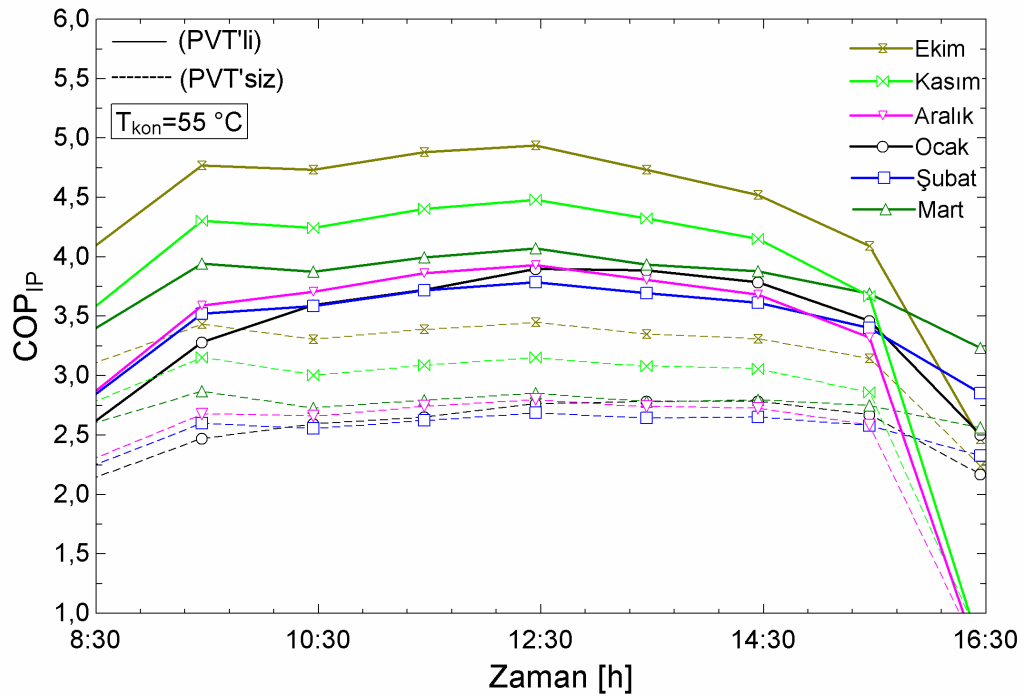


Şekil 4.20. Antalya ili Aralık ayı sıcaklık ve ısıtım değerlerine göre sabit devirli kompresör ile çalışan PVT'li ve PVT'siz sistemin COP ısıtma değeri ve kondenser sıcaklığının değişimi



Şekil 4.21. Antalya ili Aralık ayı saatlik ortalama ısıtım değerleri ve kondenser sıcaklıkları

Şekil 4.20’de Antalya ili için saatlik olarak sıcaklık ve ışıınının aralık ayı içerisindeki ortalama değeri dikkate alınarak sabit devirli kompresör ile çalışan PVT’li ve PVT’siz sistemin COP değeri araştırılmıştır. PVT’li ısı pompası COP ısıtma performans katsayısı PVT’siz ısı pompası COP ısıtma performans katsayısı değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin saat 13:45’te PVT’li ısı pompası COP_{IP} değeri 5,8, PVT’siz ısı pompası COP_{IP} 3,9’dur. Bu durumda kondenser sıcaklığı 42,5 °C olmaktadır. Kondenser sıcaklığı artarken performans katsayısı düşmektedir. Bu, PVT’den gelen ısı enerji miktarının, evaporatör kapasitesine eşit olması gerektiğinden dolayıdır. Işınım arttığında PVT-Evaporatöre aktarılan ısı enerji miktarı, evaporatör kapasitesi ve ona bağlı olarak gerekli kütleli debi artmakta, bu nedenle sabit devirle çalışan ısı pompası kompresörü soğutucu akışkanı daha düşük kondenser basıncına (sıcaklığına) basabilmekte, böylece kondenser sıcaklığı azalmaktadır (Şekil 4.21).

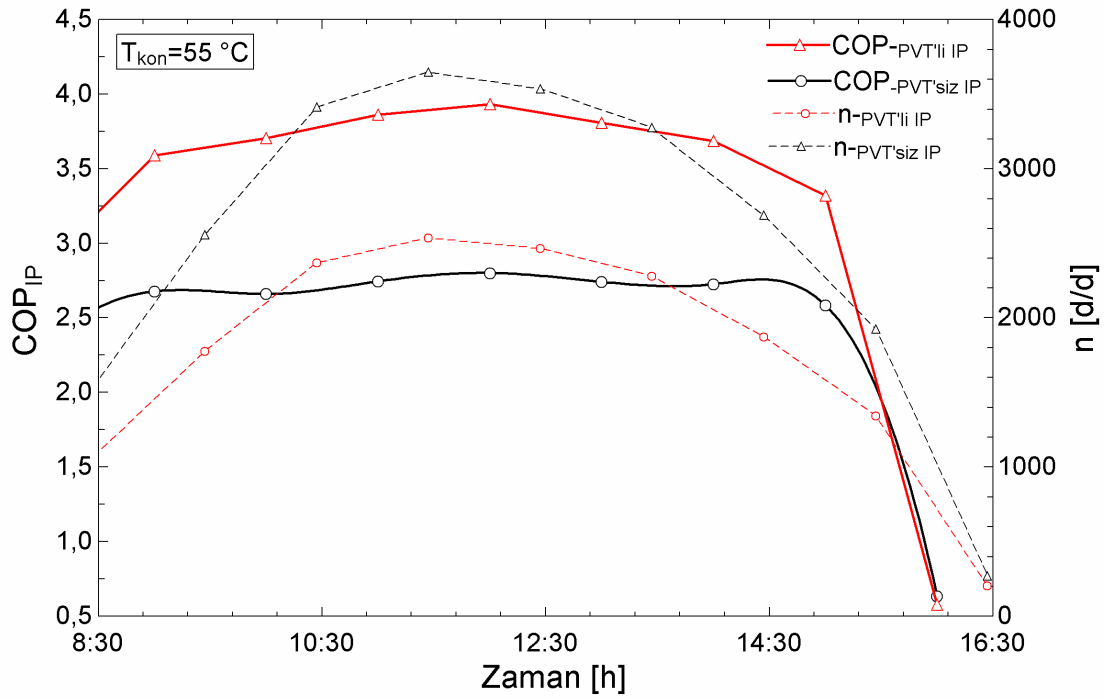


Şekil 4.22. Değişken devirli kompresör ile çalışan PVT’siz ve PVT’li ısı pompası bütünleşik sisteminin Antalya ili COP ısıtma değerleri

Şekil 4.22’de Antalya ilinde kurulduğu düşünülen, değişken devirli kompresör ile çalışan PVT’siz ve 1,65x9 m² PVT’li ısı pompası bütünleşik sisteminin COP ısıtma

değerleri saatlik olarak sıcaklık ve ısıtımın ay içerisindeki ortalama değerleri dikkate alınarak ısıtma sezonu (Ekim-Mart) ayları için verilmiştir. Şekil 4.22'ye göre PVT'li sistemin COP_{IP} değerleri PVT'siz sistemin COP_{IP} değerlerine göre daha yüksektir. PVT'li ve PVT'siz değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için, kondenser sıcaklığı $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{evap-PVT'li}=T_{çevre}$ ve $T_{evap-PVT'siz}=T_{çevre}-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alınmıştır. Bu şartlarda, PVT'siz ısı pompası sisteminin ortalama COP_{IP} değeri 2,724 bulunurken PVT'li sistemin ortalama COP_{IP} değeri 3,665 yani %34,55 daha yüksek bulunmuştur.

Ekim ayında elde edilen PVT'li ve PVT'siz değişken devirli ısı pompası COP_{IP} değerlerinin diğer aylara göre daha yüksek olduğu, en düşük COP_{IP} değerlerinin ise Ocak ayında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.23. Antalya ili Aralık ayı sıcaklık ve ısıtım değerlerine göre değişken devirli kompresör ile çalışan PVT'li ve PVT'siz ısı pompası bütünlük sistemin COP ısıtma değeri ve devir sayısının gün içerisindeki değişimi

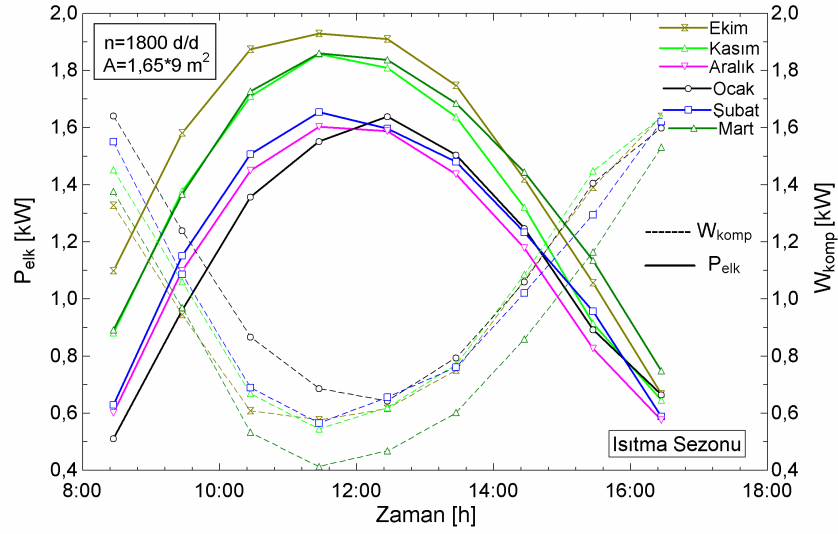
Şekil 4.23'te saatlik olarak sıcaklık ve ısıtım değerlerinin değişimlerinin ay içerisindeki ortalama değerleri dikkate alınarak değişken devirli kompresör ile çalışan PVT'li ve PVT'siz sistemin COP değerleri sunulmuştur. Değişken devirde ve sabit kondenser sıcaklığında ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$) çalışan sistem (Şekil 4.22), sabit devirde ve değişken

kondenser sıcaklığında çalışan sisteme (Şekil 4.19) göre daha geniş bir saat aralığında yüksek COP sağlamaktadır. Gün içerisinde ısıtım ve çevre sıcaklığına bağlı olarak PVT'den çekilen ısı enerjisi miktarı da değişmektedir ve buna bağlı olarak evaporatör kapasitesi değişir. Artan evaporatör kapasitesine bağlı olarak kütleli debi de artar ve bunu sağlayabilmek için sistem, devir sayısını artırır. PVT'siz ısı pompası bütünleşik sistem devir sayısı PVT'li sistemden daha yüksektir. Saat 13:45'e baktığımızda PVT'li ısı pompası COP_{IP} değeri 3,8, devir sayısı 2280 d/d, PVT'siz ısı pompası COP_{IP} 2,74 ve devir sayısı 3276 d/d'dir.

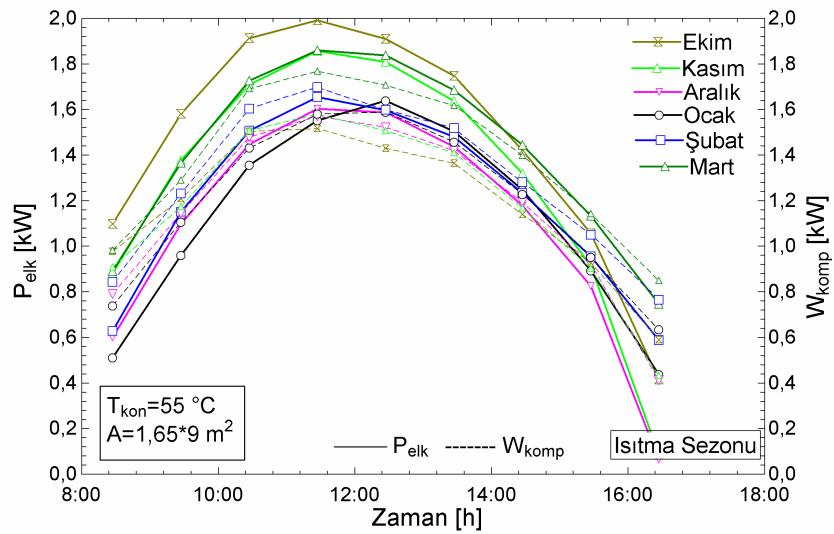
Değişken devirde ve sabit devirde çalışan ısı pompası sistemlerinin COP değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.19 ve Şekil 4.22), sabit devirde çalışan ısı pompası sisteminin daha yüksek COP_{IP} değerleri verdiği görülse de saat 10:00-14:00 arasında ısıtım değerine bağlı olarak kondenser sıcaklığı, ısıtımın yüksek olduğu mart ayında $\sim 25^{\circ}C$ 'ye kadar düşmekte yani ısıtma sıcaklığı yetersiz kalmaktadır. Bunun nedeni Şekil 4.21'de açıklandığı gibi ısıtım arttığında PVT-Evaporatöre aktarılan ısı enerjisi miktarı, evaporatör kapasitesi ve ona bağlı olarak gerekli kütleli debi artmakta, sabit devirle çalışan ısı pompası kompresörü soğutucu akışkanı daha düşük kondenser basıncına (sıcaklığına) basabilmekte, böylece kondenser sıcaklığı azalmaktadır. Değişken devirli sistemde ise devir sayısı yükseltilerek kondenser sıcaklığı $55^{\circ}C$ 'de sabit tutulabilmektedir.

Antalya ili ısıtma sezonu, (Ekim-Mart) ayları, saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerlerine göre elde edilen elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücü Şekil 4.24'te sunulmuştur. Şekil 4.24-a'ya göre sabit devirli ısı pompası bütünleşik sistemde ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) ayları gündüz saatlerinde ısıtım miktarının yüksek olduğu 10.00-14.00 saatleri arasında elektrik üretimi artmış ve kompresör tüketim gücünü karşılamıştır. Ancak kondenser sıcaklığının kompresör tüketim güç eğrisine benzer bir karakter izlediği (Şekil 4.21) ve ısıtma sezonunda ısıtımın yüksek olduğu öğle saatlerinde kondenser sıcaklığının $25^{\circ}C$ 'ye kadar düştüğü için yeterli ısıtma sıcaklığı sağlayamayacağı göz ardı edilmemelidir. Değişken devirli ısı pompası bütünleşik sistemde ise ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) ayları ısıtım miktarına bağlı olarak elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücü artmıştır. Bunun sebebi PVT'den elde edilen ısı enerjisi miktarı ısıtım ile artar. Böylece evaporatör kapasitesi ve soğutucu akışkanın kütleli debisi artar. Artan debiyi karşılamak için de sistem devir sayısını artırır. Böylece kompresör tüketim gücü artmış öğle saatlerine artmış olur (Şekil 4.24-b). Isıtma sezonu

boyunca kondenser sıcaklığının sabit ve $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu, bunu sağlamak için kompresör devir sayısının artırıldığı ve bu nedenle kompresör gücünün de yükseldiği göz ardı edilmemelidir. Işınımın yüksek olduğu öğle saatlerinde elektrik üretim gücünün kompresör tüketim gücünden daha yüksek veya eşit iken ışıının çok az olduğu sabah ve akşam saatlerinde ise elektrik üretiminin kompresör tüketim gücünden az olduğu ve başka bir kaynakla takviye güce ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır.



(a)

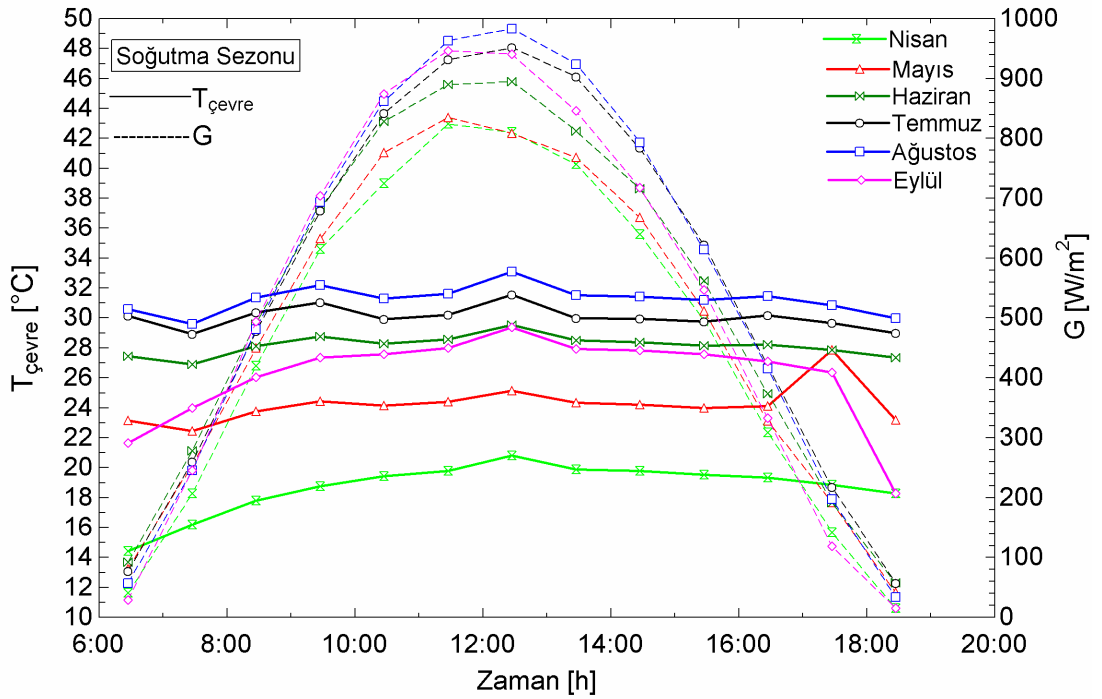


(b)

Şekil 4.24. Isıtma sezonu için sabit (a) değişken (b) devirli ısı pompası bütünsel sistemde elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücünün gün içerisindeki değişimi

4.4.2. Antalya İli İçin PVT'li Bütünleşik ve PVT'siz Isı Pompası Sistemlerinin Soğutma Sezonu Aylık COP Değişimleri

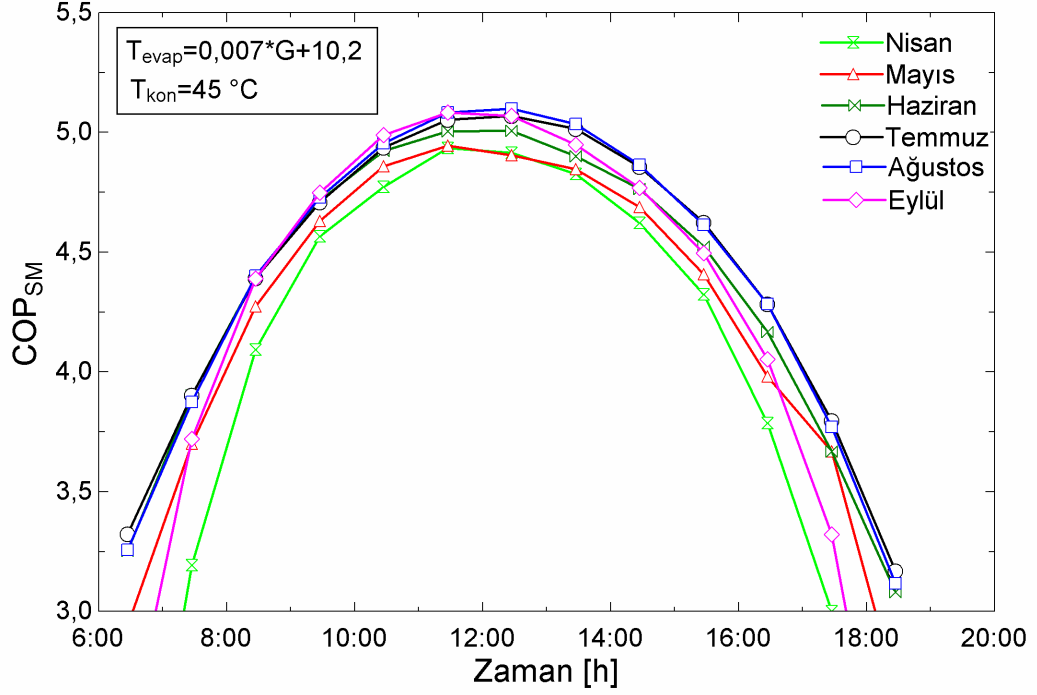
Antalya ili soğutma sezonu, (Nisan-Eylül) ayları, saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerleri 2022 yılı için (Anonim-5)'den alınıp düzenlenerek Şekil 4.25'te sunulmuştur. Buna göre soğutma sezonu boyunca (Nisan-Eylül) ayları gündüz saatlerinde, en yüksek sıcaklığın Ağustos ayında saat 12.45'te ortalama 33,08 °C olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.25'e göre aylık ortalama sıcaklık değerlerinin gündüz saatlerinde çok değişmediği, gündüz saatlerindeki en çok sıcaklık değişiminin eylül ayında ve 11,13 °C olduğu görülmektedir. Antalya ili soğutma sezonu (Nisan-Eylül) ayları gündüz saatlerinde, en yüksek ısıtımın Ağustos ayında saat 12.45'te ve ortalama 983 W/m² olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.25. Antalya ili soğutma sezonu, (Nisan-Eylül) ayları boyunca saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerleri

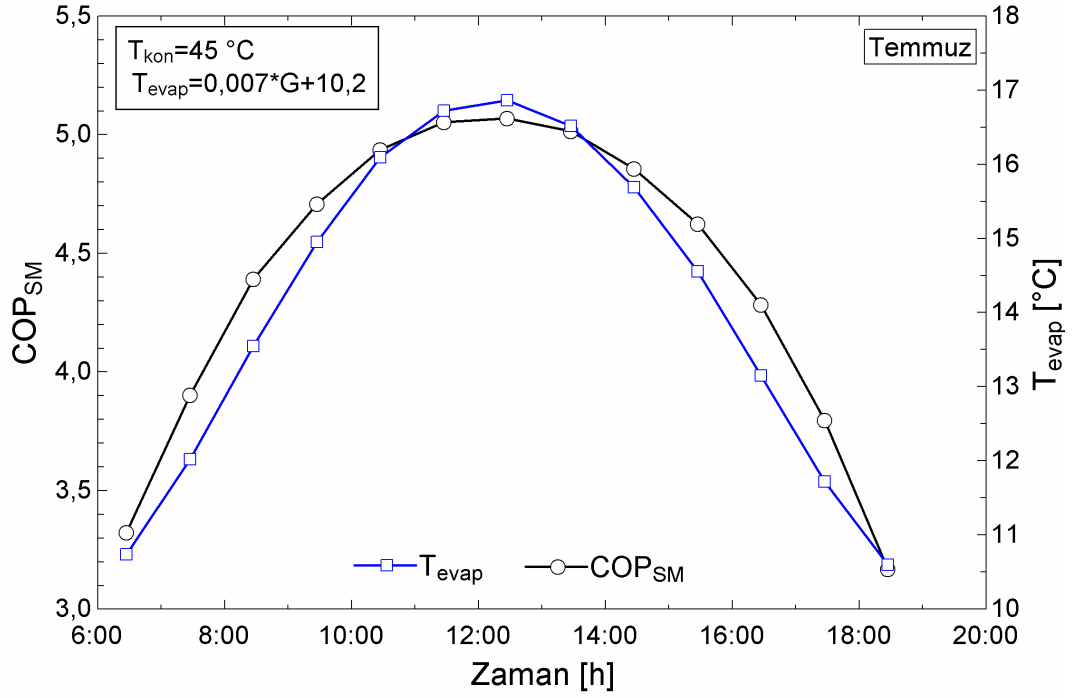
Soğutma sezonu için PVT'li ve PVT'siz, sabit ve değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemlerinin analizinde kondenser sıcaklığı 45 °C alınmış, kompresör devri sabit tutulduğunda evaporatör sıcaklığı PVT'den gelen ısı enerjisi karşılayacak ($Q_{PVT}=Q_{evap}$) evaporatör sıcaklığı bulunarak analizler yapılmıştır. Kompresör devri

değişken olduğunda ise evaporatör sıcaklığı gelen ışıınım miktarına göre $T_{evap} = 0,007 \times G + 10,2$ eşitliği ile ve ışıınıma bağılı olarak hücre sıcaklığı arttığı için $T_{hücre} - T_{evap} \leq 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ olacak şekilde belirlenmiş ve PVT'den gelen ısıı enerjiiyi karşıılayacak ($Q_{PVT} = Q_{evap}$) devir sayısı bulunarak analizler yapılmıştır.



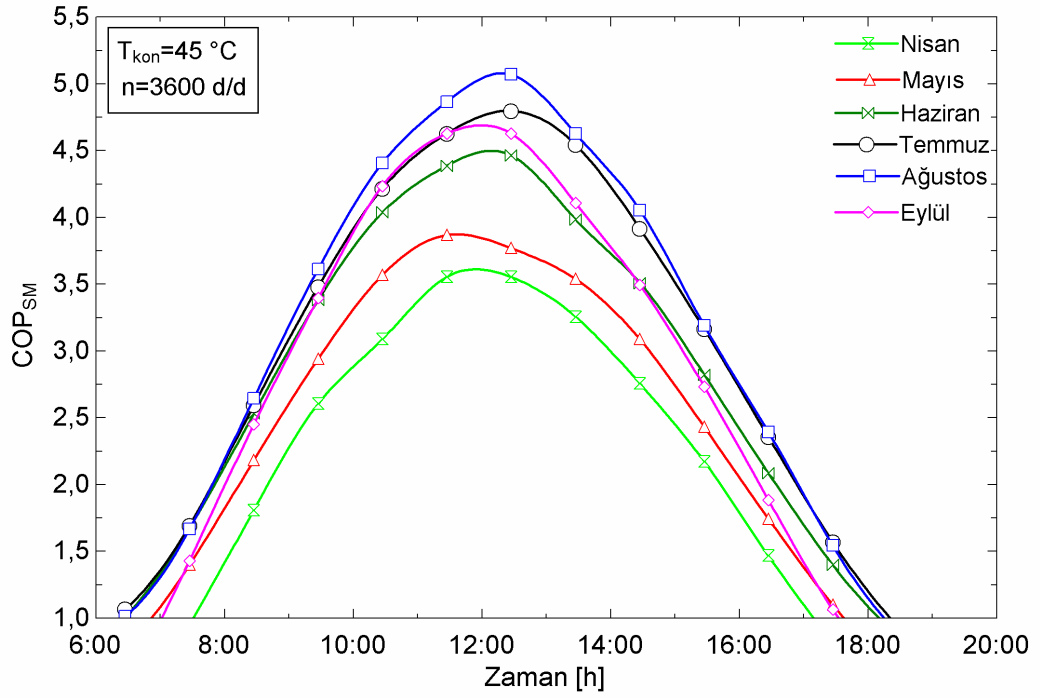
Şekil 4.26. Antalya ili soğutma sezonu için değişken devirli kompresör ile çalışan ısı pompası bütünsel sisteminin saatlik COP soğutma değerleri

Şekil 4.26'da saatlik olarak sıcaklık ve ışıınımın ay içerisindeki ortalama değerleri soğutma sezonu aylarında COP soğutma performans katsayıları sunulmuştur. En yüksek soğutma performans katsayısı ağustos ayında saat 12.45'te 5,09 olarak bulunmuştur.



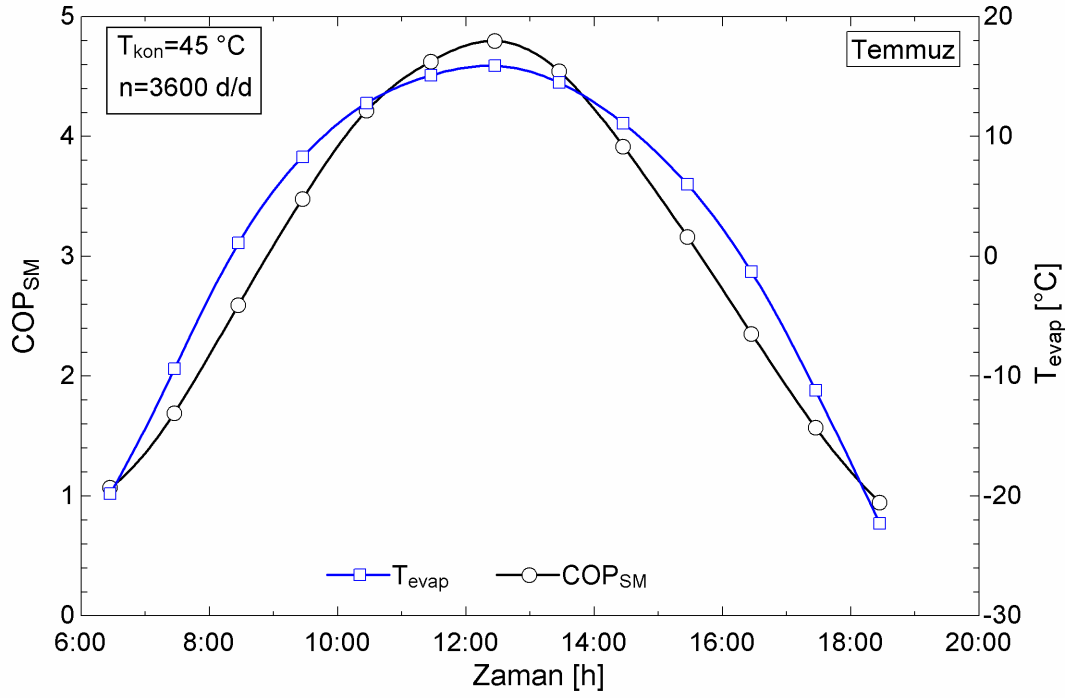
Şekil 4.27. Antalya ili temmuz ayı değişken devirli kompresör ile çalışan sistemin COP soğutma değeri ve evaporatör sıcaklığının gün içerisindeki değişimi

Şekil 4.27’de değişken devir sayılı kompresör ile çalışan bütünleşik sistemin COP değerleri ve evaporatör sıcaklıklarının gün içerisindeki değişimi gösterilmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi, ışıınıma bağlı olarak hücre sıcaklığı arttığı için evaporatör sıcaklığı da artmaktadır. Saat 12.45’te, ışıınım 952 W/m^2 iken, evaporatör sıcaklığı $16,86 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve soğutma performans katsayısı $5,06$ olmaktadır.



Şekil 4.28. Antalya ili soğutma sezonu için sabit devirli kompresör ile çalışan ısı pompası bütünleşik sisteminin saatlik COP_{SM} soğutma değerleri

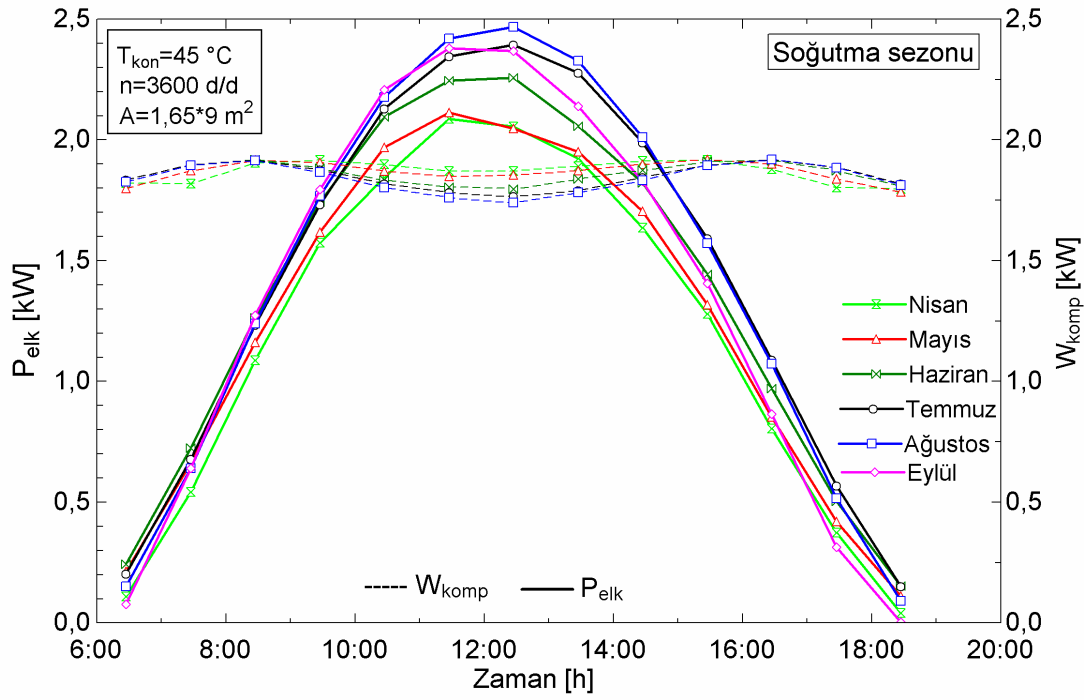
Şekil 4.28’de Antalya ili soğutma sezonu için saatlik olarak COP soğutma performans katsayıları sunulmuştur. Kondenser sıcaklığı $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de sabitken, ısınıma bağlı olarak evaporatör sıcaklığı yükseldiğinden en yüksek soğutma performans katsayısı ağustos ayında elde edilmiştir. Şekil 4.28’e göre ağustos ayında saat 12.45’te COP_{SM} , 5,07 olarak bulunmuştur. Bu noktada ısınım 983 W/m^2 , evaporatör sıcaklığı $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, çevre sıcaklığı $33,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kondenser sıcaklığı $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir.



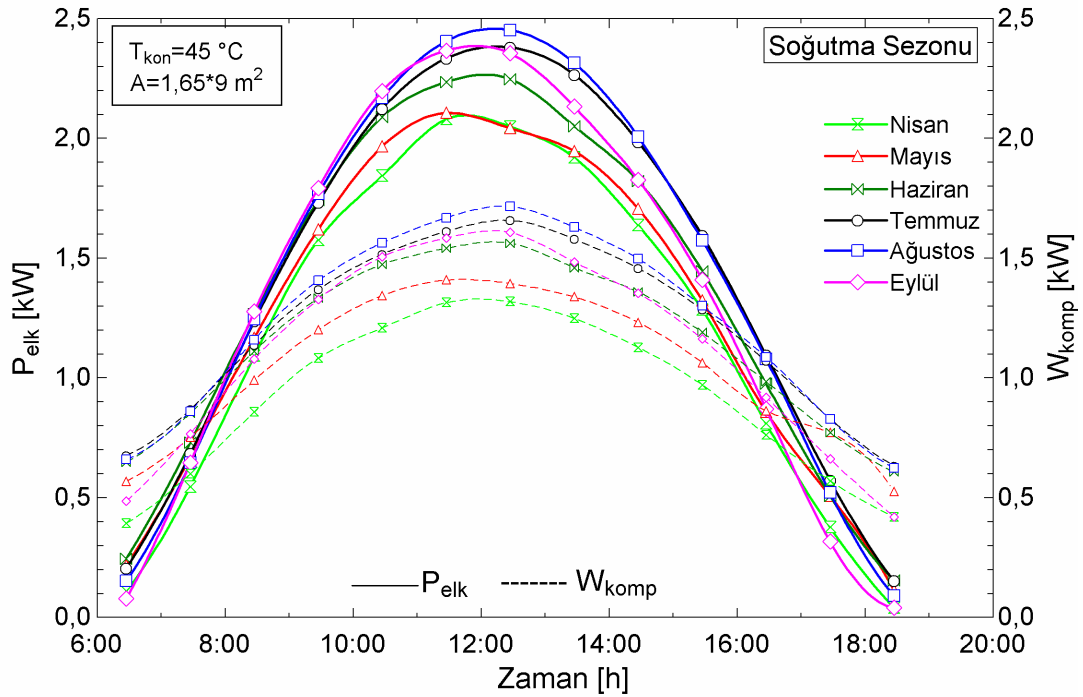
Şekil 4.29. Antalya ili temmuz ayı sabit devirli kompresör ile çalışan sistemin COP soğutma değeri ve evaporatör sıcaklığının gün içerisindeki değişimi

Şekil 4.29, sabit devir sayılı kompresör ile çalışan bütünleşik sistemin COP değerlerini ve evaporatör sıcaklıklarının gün içerisindeki değişimini göstermektedir. Kompresör devri ($n=3600\text{ d/d}$) sabit tutulduğunda PVT'den ışınlı gelen ısı enerjisi ($Q_{PVT}=Q_{evap}$) olacak şekilde ve ışınlı birlikte evaporatör sıcaklığı da artmaktadır. Saat 12.45'te ışınlı 952 W/m^2 iken evaporatör sıcaklığı $15,9\text{ °C}$ iken soğutma performans katsayısı 4,79 olmaktadır.

İşinım ve çevre sıcaklığına bağlı olarak, sabit ve değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için en yüksek COP_{SM} değeri Ağustos ayında, saat 12.45'de, hemen hemen eşit ve 5,08 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.28 karşılaştırıldığında, Antalya ili soğutma sezonu için ısı pompası değişken devirli olarak çalıştırıldığında sabit devirli ısı pompalı sisteme göre, daha geniş bir zaman aralığında, nispeten yüksek COP_{SM} elde edilebileceği görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.30. Soğutma sezonu için sabit (a) ve değişken (b) devirli ısı pompası bütünleşik sistemde elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücünün gün içerisindeki değişimi

Antalya ili soğutma sezonu, (Nisan-Eylül) ayları, saatlik ortalama sıcaklık ve ısıtım değerlerine göre elde edilen elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücü Şekil 4.30'da sunulmuştur. Şekil 4.30-a'ya göre sabit devirli kompresörlü bütünleşik sistemde soğutma sezonu ayları boyunca gündüz saatlerinde ısıtım miktarının yüksek olduğu 09.45-14.45 saatleri arasında elektrik üretimi kompresör tüketim gücünü karşılamıştır. Değişken devirli ısı pompası bütünleşik sistemde ise soğutma sezonu aylar boyunca ısıtım miktarına bağlı olarak elektrik üretimi ve kompresör tüketim gücü artmıştır. Bunun sebebi PVT'den elde edilen ısı enerjisi miktarı ısıtım ile artar. Böylece evaporatör kapasitesi ve soğutucu akışkanın kütleli debisi artar. Artan debiyi karşılamak için de sistem devir sayısını artırır. Böylece kompresör tüketim gücü artmış öğle saatlerine artmış olur (Şekil 4.30-b). Şekil 4.30-b'ye göre değişken devirli kompresörlü bütünleşik sistemde soğutma sezonu ayları boyunca gündüz saatlerinde 08.45-16.45 saatleri arasında elektrik üretimi kompresör tüketim gücünü karşılamıştır. PVT bütünleşik sabit veya değişken devirli ısı pompası sisteminde kondenser sıcaklığı 45°C olarak alınmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Dünyada kullanılan enerjinin %40'ı binalarda tüketilmektedir. Bu tüketilen enerjinin önemli bir kısmı ısıtma ve soğutmada kullanılmaktadır. Bu nedenle yüksek verimli ısıtma ve soğutma sistemlerinin geliştirilmesi önemlidir.

Bu tez çalışmasında bir konut veya ofisin ısıtma-soğutma ihtiyacını karşılamak ve aynı zamanda ışıının olduğu zaman diliminde elektrik üretmek amacıyla kullanılabilir PVT (fotovoltaik termal) ve ısı pompası bütünleşik sisteminin enerjetik analizi yapılmıştır.

Öngörülen sistemde SUNPOWER SPR-MAX3-400 PVT Modülü ve R404A soğutucu akışkan kullanan sabit ve/veya değişken devirde çalışabilen hermetik scroll kompresörlü (VLZ028TGA) ısı pompasının kullanıldığı düşünülmüştür. Sistemin matematiksel modeli kurulmuş, farklı çalışma modları ve kısıtları içerecek şekilde oluşturulan çözüm algoritmaları EES'ye (Engineering Equation Solver) aktararak parametrik analizler yapılmıştır. Işınım miktarı, PVT panel alanı ve çevre sıcaklığı parametrelerinin her birinin PVT panellerden üretilen elektrik gücüne, PVT'nin elektriksel verimine, kompresör güç tüketimine, bütünleşik (PVT + ısı pompalı) ve PVT'siz (sadece ısı pompalı) sistemin ısıtma ve soğutma kapasitelerine ve performans katsayılarına etkileri incelenmiştir. Öngörülen sistemin, Antalya'da kurulması ve $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ PVT alanına sahip olması durumunda Antalya ilinin 2022 yılı dış ortam sıcaklık ve ışıının değerleri kullanılarak ısıtma ve soğutma sezonu boyunca aylık bazda gündüz saatlerinde (dinamik) termal performansı analiz edilmiştir.

Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- PVT panelden üretilen elektrik enerjisinin, ışıının miktarı ve kolektör alanının artmasıyla lineer olarak arttığı, çevre sıcaklığının artmasıyla ise lineer olarak azaldığı belirlenmiştir. PVT panelden üretilen ısı enerjisinin ise ışıının miktarı, kolektör alanı ve çevre sıcaklığı artarken lineer olarak arttığı tespit edilmiştir.
- PVT panel (hücre) sıcaklığının artması ile PVT elektriksel veriminin azaldığı bilindiğinden panel hücre sıcaklığını düşürmek amacıyla panelin soğutucu akışkan R404A ile soğutulduğu yani PVT-Evaporatör entegrasyonu yapıldığı düşünülmüştür. Işınım 1000 W/m^2 ve çevre sıcaklığı 0°C iken PVT paneli hücre sıcaklığı 25°C 'den $17,8^\circ\text{C}$ 'ye soğutulduğunda PVT'nin elektriksel veriminin

%1,76 arttığı belirlenmiştir. Buna göre bu şartlar altında panel 1 °C soğutulduğunda elektriksel verim %0,24 yükselmektedir.

- Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompalı ve PVT'li bütünleşik sistemde kolektör alanının veya ısıtım miktarının artışı ile panelden ısı pompasının evaporatörüne çekilen ısı enerjisi ve dolayısıyla bu ısı enerjisi çekebilecek evaporatördeki akışkan debisi ve kondenser ısıtma kapasitesi artmaktadır. Debinin artmasıyla, kompresör sabit devirde çalıştığı için, kompresördeki basınç artışı ve dolayısıyla kondenser sıcaklığı düşmektedir. Tüm bu parametrelere bağlı olarak kompresörde tüketilen güç azalmakta ve COP_{IP} yükselmektedir.
- Sabit hızlı bir kompresörde çevre sıcaklığı artışı ile hem PVT'li hem de PVT'siz ısı pompasında evaporatör ve kondenser sıcaklığı artmaktadır. Evaporatör sıcaklığının artışı kompresöre emilen soğutucu akışkanın özgül hacminin azalmasına sebep olur ve böylece kütleli debi artar. Debi artarken evaporatör kapasitesi nispeten sabit kalmakta, kondenser kapasitesi, kompresör tüketim gücü ve kondenser sıcaklığı artmakta, COP_{IP} ise azalmaktadır.
- Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompalı ve PVT'li bütünleşik sistemde artan fotovoltaik termal panel alanı veya ısıtım miktarı ile PVT'den çekilen ısı enerjisi ve evaporatör kapasitesi artar. Kondenser sıcaklığı 55 °C sabit ve evaporatör sıcaklığı 0 °C iken, evaporatör kapasitesi arttıkça soğutucu akışkanın kütleli debisi artar. Artan debiyi karşılamak ve 55 °C kondenser sıcaklığına ulaşmak için kompresör devir sayısının artırılması gerekir. Artan devir sayısı ile ısıtma kapasitesi ve kompresörde tüketilen güç de artar. Isıtım değeri ve/veya panel alanı artırıldığında, kompresörde tüketilen güç ve kondenser kapasitesindeki değişime bağlı olarak COP_{IP} değeri ilk başta hızla artmakta belirli bir değerden sonra ise artış oranı yavaşlamakta, panel alanının belirli bir değerinden sonra da COP_{IP} hemen hemen sabit kalırken, ısıtım miktarının belirli bir değerinden sonra ise COP_{IP} değeri hafifçe de olsa azalmaktadır.
- Değişken hızlı bir kompresörlü ısı pompasında kondenser sıcaklığı 55 °C'de sabitken çevre sıcaklığı artışı ile evaporatör sıcaklığı artmakta, $T_{kon}-T_{evap}$ sıcaklık farkı ve P_{kon}/P_{evap} basınç oranı düşmekte ve kompresör için daha düşük devir sayısı yeterli olmaktadır. Kompresör daha düşük devir sayısında çalıştığından; debi, kompresör gücü, kondenser ısıtma gücü azalmakta ve ısıtma performans katsayısı COP_{IP} artmaktadır.

- Değişken devirli ısı pompası sisteminde, PVT panel alanı $1,65 \times 9 \text{ m}^2$ ve ısıtım miktarı 500 W/m^2 , çevre sıcaklığı $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kondenser sıcaklığı $55 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında PVT'siz ısı pompası için kompresör tüketim gücü %31,94 daha yüksektir. PVT'li ısı pompalı sistemin COP_{IP} değeri, PVT'siz ısı pompalı sisteme göre %27,87 daha yüksektir.
- Antalya ili 2022 yılı sıcaklık ve ısıtım değerlerinin ay içerisindeki gündüz saatleri ortalama değerleri dikkate alınarak, öngörülen sistemler analiz edildiğinde, ısıtma sezonunda (Ekim-Mart) PVT'li sistemin COP_{IP} değerlerinin PVT'siz sisteme göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Örneğin PVT'li ve PVT'siz değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için, PVT'siz sistemin ısıtma sezonu ortalama COP_{IP} değeri 2,724 bulunurken PVT'li sistemin ısıtma sezonu ortalama COP_{IP} değeri 3,665 yani %34,55 daha yüksek bulunmuştur.
- Değişken devirde ve sabit kondenser sıcaklığında ($55 \text{ }^\circ\text{C}$) çalışan bütünleşik sistem, sabit devirde ve değişken kondenser sıcaklığında çalışan sisteme göre gün içinde daha geniş bir zaman diliminde yüksek COP değerlerine sahiptir.
- Antalya ili için sabit devirli ısı pompalı bütünleşik öngörülen sistemin kullanıldığı varsayıldığında ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) ayları gündüz saatlerinde ısıtım miktarının yüksek olduğu 10.00-14.00 saatleri arasında üretilen elektrik kompresör tüketim gücünü karşılamıştır. Ancak ısıtma sezonunda ısıtımın yüksek olduğu öğle saatlerinde kondenser sıcaklığının $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ya kadar düştüğü için sabit devirli ısı pompası bütünleşik sistemin yeterli ısıtma sıcaklığı sağlayamayacağı göz ardı edilmemelidir. Antalya ili için $55 \text{ }^\circ\text{C}$ kondenser sıcaklığına sahip değişken devirli ısı pompalı bütünleşik öngörülen sistemin kullanıldığı varsayıldığında ise ısıtma sezonu boyunca (Ekim-Mart) ayları ısıtım miktarına bağlı olarak ısıtımın yüksek olduğu öğle saatlerinde elektrik üretim gücü kompresör tüketim gücünden daha yüksek veya yaklaşık eşit iken ısıtımın çok az olduğu saatlerde ise elektrik üretiminin kompresör tüketim gücünden az olduğu ve başka bir kaynakla takviye güce ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır.
- Soğutma sezonu (Nisan-Eylül) için ısıtım ve çevre sıcaklığına bağlı olarak, PVT'li veya PVT'siz, sabit veya değişken devirli kompresörlü ısı pompası sistemleri için en yüksek COP_{SM} değeri Ağustos ayında, saat 12.45'de, hemen hemen eşit ve 5,08 olarak belirlenmiştir.

- Sabit devirli ısı pompalı bütünleşik öngörülen sistemin kullanıldığı ve kondenser sıcaklığının 45°C olduğu varsayıldığında Antalya ili için soğutma sezonu, (Nisan-Eylül) ayları boyunca gündüz saatlerinde ısıtım miktarının yüksek olduğu 09.45-14.45 saatleri arasında elektrik üretimi kompresör tüketim gücünü karşılamıştır. Değişken devirli ısı pompalı bütünleşik öngörülen sistemin kullanıldığı ve yine kondenser sıcaklığının 45°C olduğu varsayıldığında ise ısıtım miktarına bağlı olarak 08.45-16.45 saatleri arasında elektrik üretimi kompresör tüketim gücünü karşılamıştır.

5.2. Öneriler

Küresel ısınma nedeniyle, konutlar için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan kombine klima sistemlerinin geliştirilmesi önemli hale gelmektedir. Mimarlar ve mühendisler enerji verimli binalar için çözüm arayışlarına devam etmektedirler. 2013'ten itibaren Fransa'daki her yeni binanın ısıtma-soğutma, aydınlatma, sıcak su ihtiyacının ortalama $50\text{kWhPE/m}^2/\text{yıl}$ olması ve bunun en az $5\text{kWhPE/m}^2/\text{yıl}$ miktarının (yani %10'unun) da yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanıyor olması istenmektedir (Auzenet ve diğ., 2013). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2050 yılında sıcak su ve ortam ısıtması ihtiyacının %14'ünün güneş kolektörleri ile sağlanacağı tahmin edilmektedir. Isı pompası ve PVT sistemlerinin kombinasyonundan oluşan bütünleşik sistemin veriminin daha yüksek olması öngörülmektedir.

Tasarlanan sistemde ısıtma ve soğutma sezonu için farklı çalışma modları etkinleştirilebilir ve böylelikle mümkün olan maksimum enerji tasarrufu tüm yıl boyunca gerçekleştirilebilir. Isı pompası ve PVT'nin entegrasyonunun dolaysız (direkt) yapılmasını sağlayan PVT-Evaporatörlerin ısı ve elektrik verimini artırılması için (PVT soğutma kanalları/şekli, soğutucu akışkan cinsi vb.) araştırmalar yapılmasının önemli olduğu, bu konuda açık literatürde bulunan verilerin kısıtlı olduğu değerlendirilmektedir. Soğuk iklim bölgeleri için kaskad (ardışık), buhar enjeksiyonlu veya ejektörlü vb. PVT'li bütünleşik sistemler üzerine teorik ve deneysel çalışmaların yapılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Anonim-1, 2022, Isı Pompası, Web adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Is%C4%B1>, [Ziyaret Tarihi: 31 Ekim 2023].
- Anonim-2, 2019, Toprak Kaynaklı Isı Pompası Kapalı Çevrim, Web adresi: <http://portal.canovateenerji.com/tr-TR/toprak-kaynali-isi-pompasi> [Ziyaret Tarihi: 23 Kasım 2019].
- Anonim-3, 2009, Module 4: Heat pump technology, Web Adresi: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-05/> [Ziyaret Tarihi: 17 Temmuz 2023].
- Anonim-4,2023, Makawi R404A, Web adresi: <https://www.anadolubakir.com/urun/makawi-r404a>, [Ziyaret Tarihi: 23 Ekim 2023].
- Anonim-5, 2023, Photovoltaic Geographical Information System, Web adresi: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR, [Ziyaret Tarihi: 06 Eylül 2023].
- Ağ, C., 2023, PVT Entegreli CO₂ ile Çalışan Bir Isı Pompası Sisteminin Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Isparta.
- Al-Zahrani, S. M., Tan, F. L., Choo, F. H., 2012, A TRNSYS simulation case study on utilization of heat pump for both heating and cooling. *Energy Science and Technology*, 3(2), 84-92.
- Auzenet E., Guiavarch A., Lokhat I., Claudon F. Improving the energy efficiency by coupling of a heat pump and hybrid PV-T panels CLIMA 2013 - 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Pages: 6882, ISBN 978-80-260-4001-9.
- ASHRAE, 2003, Methods of testing to determine the performance of solar collectors. ASHRAE, Atlanta.
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., Rehman, S., 2013, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy*, 59, 445-453.
- Bannister,C.J., Collins M.R.,2015, Development and performance of a dual tank solar-assisted heat pump system, *Applied Energy*, 149, 125-132.
- Bannister, C.J., Wagar, 2014, Validation of a Single Tank, Multi-mode Solar-assisted Heat Pump TRNSYS Model, *Energy Procedia*, 48: 499-504.

- Bisengimana, E., Zhou, J., Binama, M., Yuan, Y., 2022, Numerical investigation on the factors influencing the temperature distribution of photovoltaic/thermal (PVT) evaporator/condenser for heat pump systems, *Renewable Energy* ,885-901.
- Brown, R. 2009, Heat Pumps – A Guidance Document for Designers, BSRIA Publications, 69 pp.
- Byrne.P., Miriel, J., Lenat, Y., 2012, Modelling and simulation of a heat pump for simultaneous heating and cooling, *Building Simulation*, 5(3): 219-232.
- Calisa, F., 2015, A novel solar-assisted heat pump driven by photovoltaic/thermal collectors: Dynamic simulation and thermoeconomic optimization, *Energy* ,95 (2016), 346-366.
- Calm, J., 2008, The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and Outlook, *International Journal of Refrigeration* ,31, 1123–1133.
- Carbonell, D., Haller, M.Y., Frank, E.,2014, Potential Benefit of Combining Heat Pumps with Solar Thermal for Heating and Domestic Hot Water Preparation, *Energy Procedia*, 57: 2656-2665.
- Carbonell, D., Haller, M. Y., Philippen, D., Frank, E. 2014, Simulations of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems for Domestic Hot Water and Space Heating, *Energy Procedia*, 48: 524-534.
- Cabrol, L., Rowley, P,2012, Towards low carbon homes – A simulation analysis of building-integrated air- source heat pump systems, *Energy and Buildings*, 48: 127-136.
- Chow, T.T., 2010, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, 365–379.
- Chu, L., Rowley, P,2012, Towards low carbon homes – A simulation analysis of building-integrated air- source heat pump systems, *Energy and Buildings*, 48: 127-136.
- Chu, J., Choi,W.,Cruickshank, C.A., Harrison,S.J.,2014, Modeling of an Indirect Solar Assisted Heat Pump System for a High Performance Residential House, *Journal of Solar Energy Engineering*, 136(4). 114
- Chen, J., 2020, Development of radiative cooling and its integration with buildings: A comprehensive review, *Solar Energy*, 212 (2020), 125–151.
- Danfoss,2014, CoolSelector2, Versiyon 5.3.0.
- Del Amo, A., 2020, Analysis and optimization of a heat pump system coupled to an installation of PVT panels and a seasonal storage tank on an educational building, *Energy and Buildings*, 226 (2020), 110373.

- Deng, J., Tian, Z., Fan, 2016, Simulation and optimization study on a solar space heating system combined with a low temperature HKIP for single family rural residential houses in Beijing. *Energy and Buildings*, 126: 2-13.
- Dinçadam F. 2008. Güneş Pilleri ile Sıcak Su Elde Etme, Sokak Aydınlatması ve Güneş Takip Sistemi Uygulaması, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Van.
- Do, K. H., Kim, T., Choi, B., Han, Y.-S., Kim, M. ,2017, Simple thermodynamic model for a solar assisted heat pump system with hybrid collectors, *Proceedings of the Asian conference on thermal sciences*, 1st ACTS-P00692.
- Dubey, S., and Tiwari, G.N.,2008, Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, *Solar Energy*, 82, 602-612.
- EES Manual, (http://software.cstb.fr/ees/solver_ees_manual_us.pdf)
- Elhadidy, M.A., Shaahid, S.M., 2000, Parametric study of hybrid (wind + solar +diesel) power generating systems, *Renewable Energy*, 21, 129-139.
- Emmi, G., Tisato, C., Zarrella, A., De Carli, M., 2016, Multi-source heat pump coupled with a photovoltaic thermal (PVT) hybrid solar collectors technology: a case study in residential application, *International Journal of Energy Production and Management*, 1(4), 382-392.
- Erdoğan, S., Yılmaz, M., Şahin, B., Özyurt, Ö. 2006, Isı pompası sistemlerinin seçimi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 92: 40-49.
- Fazlıç, M., 2018, Güneş Enerjisi Destekli Hava Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Yardımıyla Bir Evin Isıtılması, Soğutulması ve Evsel Sıcak Su İhtiyacının Karşıllanması Üzerine Fizibilite Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Fu, Y. ,2014, Investigation of Solar Assisted Heat Pump System Integrated with High-rise Residential Buildings, Doktora Tezi, *University of Nottingham*, Nottingham.
- Gholamian, E., Barmas, R.B., Zare, V., Ranjbar, S.F., 2022, The effect of Incorporating phase change materials in building envelope on reducing the cost and size of the integrated hybrid-solar energy system: An application of 3E dynamic simulation with reliability consideration, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102067.
- Gürenli, M., Atamtürk, U. ,2012, Türkiye ‘de Yaygın Olan Kullanım Sıcak Suyu Sistemlerine Genel Bir Bakış Hızlı Boyler ve Depo şarj Sisteminin Karşılaştırmalı Analizi, *Tesisat Mühendisliği*, Sayı 129, Mayıs/Haziran.
- Hawlader, M.N.A., Jahangeer, K.A., 2006, Solar heat pump drying and water heating in the tropics, *Solar Energy*, 80, 492–499.

- Hepbasli, A., Kalinci Y., 2009, A review of heat pump water heating systems. Renewable and Sustainable ,*Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229.
- Hou, L., 2016, An experimental and simulative study on a novel photovoltaic-thermal collector with micro heat pipe array (MHPA-PV/T), *Energy and Buildings* , 124 (2016), 60–69.
- Ji, J., 2007, 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 (2009), 1365–1373.
- Jingyong, C. ,2017, A novel PV/T-air dual source heat pump water heater system: Dynamic simulation and performance characterization , *Energy Conversion and Management*, 148 (2017), 635–645.
- Jonas, D., Frey, G., Theis, D., 2017, Simulation and performance analysis of combined parallel solar thermal and ground or air source heat pump systems. *Solar Energy*, 150: 500-511.
- Kamel, R. S., Fung, A. S., 2014, Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+HKIP system in cold climate—Canada. *Energy and Buildings*, 82: 758-770.
- Kandirmış, G. 2017. Isı Pompası Destekli Güneş Enerjili Bir Su Isıtma Sisteminin TRNSYS Programı ile Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Kaygusuz, K., 1995, Performance of Solar-Assisted Heat-Pump Systems, *Applied Energy* 51 (1995), 93-109.
- Kırtepe, E., Güngör, A., 2017, Binalarda Bütünleşik Güneş Enerjisi Uygulama Örnekleri, *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 303-328.
- Kim, J., Kim, J. T., 2012, The experimental performance of an unglazed pv-thermal collector with a fully wetted absorber. *Energy Procedia*, 30(1), 144-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.018>
- Koçak, S., Hacim ısıtma amaçlı güneş enerjisi destekli su kaynaklı ısı pompası çevriminin teorik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya.
- Lazzarin, R., 2020, Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future, *International Journal of Refrigeration* , 116 (2020) , 146–160.
- Liu, W., Yao, J., Jia, T., Zhao, Y., Dai, Y., Zhu, J., Novakovic, V., 2023, The performance optimization of DX-PVT heat pump system for residential heating, *Renewable Energy* 206, 1106–1119.
- Lie, K.W., 2022, Model Development and Performance Analysis of an R290 Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump System using PVT, Master's thesis,

Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Faculty of Engineering Science and Technology.

- Li, H., Sun, L., Zhang, Y., 2014, Performance investigation of a combined solar thermal heat pump heating system, *Applied Thermal Engineering*, 71(1): 460-468.
- Li, Y.-H., Kao, W.-C., 2017, Performance analysis and economic assessment of solar thermal and heat pump combisystems for subtropical and tropical region, *Solar Energy*, 153: 301-316.
- Mesquita, D. B., Silva, J. L. S., Moreire, H. S., Kitayama, M., & Villalva M. G. ,2019, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*. September 15-18, Latin America, 1-6.
- Miglioli A., Aste, N., Pero, C.D., Leonforte, F.,2023, Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and design methods ,*Energy and Built Environment* ,39-56.
- Morrison, G. L., Anderson, T., Behnia, M., 2004, Seasonal performance rating of heat pump water heaters, *Solar Energy*, 76(1-3): 147-152.
- Obalanlege, M., 2020, Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity, *Renewable Energy* ,148 (2020) ,558-572.
- Qu, M. , 2015, Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system, *Applied Thermal Engineering* , 94 (2016) ,819–826.
- Uyar, F., 2016, Solar Panel Çeşitleri Nelerdir? <https://www.enerjibes.com/solar-panel-cesitleri-nelerdir/>. (Son erişim tarihi: 07 Aralık 2022)
- Poppi, S., 2017, Solar heat pump systems for heating applications. In *KTH Royal Institute of Technology*. (pp. 1-88)
- Rüstemli, S., Dinçer, F., Almalı, M.N., 2012, Research on effects of environmental factors on photovoltaic panels and modeling with Matlab/Simulink, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7a/2012.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A., Mahdavi, M., 2010, An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Applied Energy*, 87, 2328–2339.
- Sayın, S., Koç, İ., 2011, Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaiik (pv) sistemler ve yapılarda kullanım biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(3), 89-106.
- Shan, M., Yu, T., Yang, X., 2016, Assessment of an integrated active solar and air-source heat pump water heating system operated within a passive house in a cold climate zone, *Renewable Energy*, 87: 1059-1066.

- Skovrup, M.J. 2000, CoolPack, Version 2,54, Department of Energy Engineering Technical University of Denmark.
- Solanki, S.C., Dubey, S., Tiwari, A., 2009, Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors, *Applied Energy*, 86, 2421–2428.
- Sobhnamayan, F., Sarhaddi, F., Alavi, M.A., Farahat, S., Yazdanpanahi, J., 2014, Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept, *Renewable Energy*, 68, 356-365.
- Sterling, S. J., Collins M. R., 2012, Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted solar domestic hot water system, *Applied Energy*, 93: 11-17.
- 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*, 1967–1976.
- Wang, G., 2017, Application of a multi-function solar-heat pump system in residential Buildings, *Applied Thermal Engineering*, 130(2018), 922-937.
- Wang, G., 2015, Performance studies on a novel solar PV/T-air dual heat source heat pump system, *Science Direct*, 121, 771-778.
- Wallati, A., 2019, Energy analysis of a thermal system composed by a heat pump coupled with a PVT solar collector, *Energy*, 174 (2019), 91-96.
- Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Coşkun, S., Kaynaklı, Ö., Yamankaradeniz, N., 2017, Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları, Bursa, 487.
- Yang, H., Wang, X., Yao, S., 2023, Thermodynamic analysis of a novel solar photovoltaic thermal collector coupled with switchable air source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 218, 119410.
- Yao, J., 2020, Theoretical analysis on efficiency factor of direct expansion PVT module for heat pump application, *Solar Energy*, 206 (2020), 677–694.
- Yao, J., Zheng, S., 2021, Performance improvement of vapor-injection heat pump system by employing PVT collector/evaporator for residential heating in cold climate region, *Energy*, 219, 119636.
- Tagliafico, L. A., Scarpa, F., & Scarpa, F., 2014, Direct expansion solar assisted heat pumps- a clean steady state approach for overall performance analysis, *Applied Thermal Engineering*, 66(1-2), 1-30.
- Tsai, H., 2015, Modeling and validation of refrigerant-based PVT-assisted heat pump water heating (PVTA-HPWH) system, *Solar Energy*, 122 (2015), 36–47.

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022, Güneş, Web adresi: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>
- Zarei, A., Liravib, M., Rabieec, M.B., Ghodratd, M., 2020, A novel, eco-friendly combined solar cooling and heating system, powered by hybrid Photovoltaic thermal (PVT) collector for domestic application, *Energy Conversion and Management*, 222, 113198.
- Zarei, A., Elahi, S., Pahangeh, H., 2022-a, Design and analysis of a novel solar compression-ejector cooling system with eco-friendly refrigerants using hybrid photovoltaic thermal (PVT) collector, 32,101311.
- Zarei, A., Akhavan, S., Ghodrat, M., Behnia, M., 2022-b, Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a modified solar trigeneration system for cooling, heating and power using photovoltaic-thermal and flat plate collectors, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 137, 106261.
- Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X., 2012, Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 599– 617.
- Zhao, Y., Dunn, A., Lin, J., & Shi, D., 2019, Photothermal effect of nanomaterials for efficient energy applications. In *Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications*, 415-434.
- 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, 603–614.
- Zondag, H.A., Vries, D.W., Helden, W.G.J., Zolingen R.J.C., Steenhoven, A.A., 2002, The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector, *Solar Energy*, 72(2), 113-128.

EKLER

EK-1 Kompresör tüketim gücü, debi ve kompresör çıkış sıcaklığını bulmak için kullanılan katsayılar ve polinom

	W_{komp}	$\dot{m}$	T_{disc}
C0	0,313317844	-23,43893452	-7,42270312
C1	0,012813258	-0,601634185	-4,172175054
C2	-0,008220898	0,935919478	3,615439309
C3	0,0002924	-0,003390877	-0,133028655
C4	0,000142202	-0,013543019	-0,076664047
C5	-1,10E-07	6,80E-06	2,72E-05
C6	-1,19E-09	6,71E-09	4,92E-07
C7	1,42E-09	-6,33E-08	-3,61E-07
C8	4,02E-05	-0,000858042	-0,004464535
C9	4,15E-07	-3,53E-06	-7,85E-05
C10	-3,70E-07	7,62E-06	5,91E-05
C11	-0,000411494	0,021928714	0,204380015
C12	-3,98E-06	2,91E-05	0,003632348
C13	4,04E-06	-0,000228671	-0,00274061
C14	1,53E-06	3,96E-06	-0,001952794
C15	-7,68E-08	3,76E-05	0,000717011
C16	-0,009775712	3,79246247	0,12824899
C17	-0,001255983	0,123147141	0,076658019
C18	0,001052642	-0,038642576	-0,038163912
C19	-2,85E-05	0,001435496	0,003290704
C20	-1,27E-05	0,00051389	0,00134608
C21	-1,80E-07	6,32E-06	4,61E-05
C22	1,04E-07	-2,01E-06	-1,29E-05
C23	0,000161874	-0,007312293	0,001127292
C24	4,40E-06	-0,000218293	-0,00046362
C25	-2,36E-06	0,000295399	0,000143884
C26	6,82E-08	-1,55E-06	-2,11E-05
C27	4,44E-08	-3,74E-06	-6,30E-06
C28	3,34E-10	2,36E-09	-3,21E-07
C29	-3,39E-10	1,06E-08	6,31E-08

- $T_{evap}=T_e$ Evaporasyon sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
- $T_{kon}=T_c$ Kondenzasyon sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
- $S=n$ Kompresör hızı [rps]

Tevap, Tkon ve n'nin fonksiyonu olarak polinom:

$$Y = C0 + C1*Te + C2*Tc + C3*Te^2 + C4*Tc^2 + C5*Te*Tc*S^2 + C6*Te^2*Tc*S^2 + C7*Te*Tc^2*S^2 + C8*Te*Tc*S + C9*Te^2*Tc*S + C10*Te*Tc^2*S + C11*Te*Tc + C12*Te^2*Tc + C13*Te*Tc^2 + C14*Te^3 + C15*Tc^3 + C16*S + C17*Te*S + C18*Tc*S + C19*Te^2*S + C20*Tc^2*S + C21*Te^3*S + C22*Tc^3*S + C23*S^2 + C24*Te*S^2 + C25*Tc*S^2 + C26*Te^2*S^2 + C27*Tc^2*S^2 + C28*Te^3*S^2 + C29*Tc^3*S^2$$

EK-2 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT’li bütünleşik sistemde kış sezonu için PVT’nin ortalama termodinamik analiz sonuçları

	Soğutulmuş hücre sıcaklığı (C)	Soğutulmamış hücre sıcaklığı(C)	$\eta_{\text{soğutulmuş}}$	$\eta_{\text{soğutulmamış}}$	Elektrik üretimi (kW)
EKİM	31,34	35,42	0,221	0,219	1,459
KASIM	27,22	30,79	0,224	0,222	1,288
ARALIK	21,69	24,68	0,228	0,226	1,093
OCAK	21,5	24,56	0,228	0,226	1,122
ŞUBAT	21,14	24,4	0,228	0,226	1,199
MART	24,92	28,79	0,226	0,223	1,410

EK-3 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem ile PVT'siz ısı pompası performans değerleri

		Isıtma kapasitesi (kW)	Kompresör tüketim gücü (kW)	COP
EKİM	PVT'Lİ	5,354	1,184	4,354
	PVT'SİZ	5,629	1,715	3,191
KASIM	PVT'Lİ	4,77	1,177	3,759
	PVT'SİZ	5,03	1,689	2,769
ARALIK	PVT'Lİ	4,109	1,161	3,257
	PVT'SİZ	4,34	1,653	2,428
OCAK	PVT'Lİ	4,22	1,191	3,413
	PVT'SİZ	4,43	1,652	2,671
ŞUBAT	PVT'Lİ	4,53	1,287	3,44
	PVT'SİZ	4,8	1,861	2,54
MART	PVT'Lİ	5,3	1,384	3,77
	PVT'SİZ	5,6	2,025	2,74

EK-4 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde yaz sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları

	Soğutulmuş hücre sıcaklığı (C)	Soğutulmamış hücre sıcaklığı(C)	$\eta_{\text{soğutulmuş}}$	$\eta_{\text{soğutulmamış}}$	Elektrik üretimi (kW)
NİSAN	20,12	30,22	0,229	0,222	1,187
MAYIS	20,78	36,45	0,228	0,218	1,254
HAZİRAN	21,79	41,37	0,228	0,215	1,353
TEMMUZ	22,47	43,94	0,227	0,213	1,418
AĞUSTOS	22,54	45,21	0,227	0,212	1,423
EYLÜL	21,67	39,18	0,228	0,216	1,337

EK-5 Değişken devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem performans değerleri

	Soğutma kapasitesi (kW)	Kompresör tüketim gücü (kW)	COP
NİSAN	4,02	0,99	3,72
MAYIS	4,48	1,13	3,84
HAZİRAN	5,3	1,257	4,96
TEMMUZ	5,65	1,326	5,01
AĞUSTOS	5,77	1,352	5
EYLÜL	5,09	1,211	4,78

EK-6 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde kış sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları

	Soğutulmuş hücre sıcaklığı (°C)	Soğutulmamış hücre sıcaklığı(°C)	$\eta_{\text{soğutulmuş}}$	$\eta_{\text{soğutulmamış}}$	Elektrik üretimi (kW)
EKİM	31,45	35,58	0,221	0,219	1,476
KASIM	27,66	31,39	0,224	0,221	1,350
ARALIK	22,09	25,22	0,227	0,225	1,150
OCAK	21,67	24,80	0,228	0,226	1,147
ŞUBAT	21,14	24,4	0,228	0,226	1,199
MART	24,92	28,79	0,226	0,223	1,410

EK-7 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem ile PVT'siz ısı pompası performans değerleri

		Isıtma kapasitesi (kW)	Kompresör tüketim gücü (kW)	COP
EKİM	PVT'Lİ	5,05	0,991	6,18
	PVT'SİZ	3,73	1,076	3,96
KASIM	PVT'Lİ	4,72	1,031	5,64
	PVT'SİZ	3,45	1,101	3,65
ARALIK	PVT'Lİ	3,30	1,111	4,47
	PVT'SİZ	3,04	1,156	3,01
OCAK	PVT'Lİ	4,19	1,104	4,52
	PVT'SİZ	3,03	1,149	3,02
ŞUBAT	PVT'Lİ	4,27	1,026	5,04
	PVT'SİZ	3,07	1,077	3,31
MART	PVT'Lİ	4,7	0,879	6,95
	PVT'SİZ	3,4	0,957	4,23

EK-8 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistemde yaz sezonu için PVT'nin ortalama termodinamik analiz sonuçları

	Soğutulmuş hücre sıcaklığı (C)	Soğutulmamış hücre sıcaklığı(C)	$\eta_{\text{soğutulmuş}}$	$\eta_{\text{soğutulmamış}}$	Elektrik üretimi (kW)
NİSAN	23,29	30,22	0,227	0,222	1,180
MAYIS	23,72	36,07	0,226	0,218	1,241
HAZİRAN	24,49	41,37	0,226	0,215	1,347
TEMMUZ	24,98	43,94	0,226	0,213	1,413
AĞUSTOS	25,03	45,21	0,225	0,212	1,419
EYLÜL	24,39	39,70	0,226	0,216	1,329

EK-9 Sabit devirde çalışan kompresörlü ısı pompası ve PVT'li bütünleşik sistem performans değerleri

	Soğutma kapasitesi (kW)	Kompresör tüketim gücü (kW)	COP
NİSAN	3,84	1,86	2,03
MAYIS	4,47	1,86	2,38
HAZİRAN	5,15	1,85	2,78
TEMMUZ	5,5	1,84	2,99
AĞUSTOS	5,61	1,84	3,07
EYLÜL	4,97	1,84	2,7