



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ HAVA
KAYNAKLI SICAK SU ISI POMPASININ
ENERJİ-EKONOMİK ANALİZİNİN
DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

Rıza BÜYÜKZEREN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Rıza BÜYÜKZEREN tarafından hazırlanan “Güneş enerjisi destekli hava kaynaklı sıcak su ısı pompasının enerji-ekonomik analizinin deneysel ve teorik incelenmesi” adlı tez çalışması 27/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Aziz Hakan ALTUN

.....

Danışman

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

.....

Üye

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE 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.

Rıza BÜYÜKZEREN

Tarih: 20.07.2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ HAVA KAYNAKLI SICAK SU ISI POMPASININ ENERJİ-EKONOMİK ANALİZİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

Rıza BÜYÜKZEREN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2022, 87 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Doç. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU
Dr. Öğr. Üyesi Aziz Hakan ALTUN
Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

Evsel sıcak su ihtiyacının karşılanması için kullanılan enerji, günümüzde konutlarda tüketilen toplam enerji içerisinde önemli bir paya sahiptir. Bu ihtiyacın karşılanması için kullanılan sistemlerin verimliliği, enerji fiyatlarında artışların yaşandığı günümüz şartlarında yadsınamaz bir öneme sahiptir. Depolanan evsel sıcak su sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için oldukça elverişlidir ve bu amaçla kullanılan en yaygın sistemler termal güneş enerjisi ve ısı pompası ile desteklenen sistemlerdir. Bu çalışmada ilk olarak, hava kaynaklı bir ısı pompası ile desteklenmiş bir evsel sıcak su sisteminin TRNSYS yazılımı kullanılarak oluşturulan modeli, iklimik bir test odasında aynı sistemin ve şartların sağlanmasıyla gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Isı pompası performans katsayısı, ortalama tank sıcaklığı, ısı pompası giriş ve çıkış su sıcaklığı olmak üzere dört farklı parametre ile doğrulama yapılarak, bu parametreler içerisindeki en yüksek ortalama sapma yüzdesi % 4,5 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, sınırlı bir çatı alanını güneş kolektörleri için kullanarak, farklı sayıda ve çeşitte güneş kolektörleriyle desteklenmiş sıcak su ısı pompası sistemlerinin simülasyonlarını yapmak amacıyla bir model oluşturulmuştur. En fazla üç kolektör olmak şartıyla farklı kombinasyonlarda termal ve fotovoltaik güneş kolektörleri eklenerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Buradan sağlanan sonuçlar ile tüm sistemlerin enerji ve ekonomik analizleri yapılarak, birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Oluşturulan dört farklı senaryonun ilkinde, bir ailenin kullanım sıcak su ihtiyacını karşılamak için hava kaynaklı ısı pompası ve boylerden oluşan bir sistem kullanılarak yıllık 1431,44 kWh-e enerji tüketilmiştir. İkincisinde, ilk senaryodaki sisteme bir güneş kolektörü eklenerek simülasyonlar yapılmış ve termal kolektör ile desteklenen sistem 866,73 kWh-e enerji tüketerek bu senaryoda yer alan en verimli sistem ve 3,9 yıl olan geri ödeme süresiyle en ekonomik sistem olmuştur. Üçüncü senaryoda, ilk senaryodaki sisteme iki güneş kolektörü eklenerek simülasyonlar yapılmıştır. İki termal kolektör ile desteklenen sistem 613,46 kWh-e enerji tüketerek bu senaryoda yer alan en verimli sistem ve 4,3 yıl olan geri ödeme süresiyle en ekonomik sistem olmuştur. Dördüncü ve son senaryoda ise, ilk senaryodaki sisteme üç güneş kolektörü eklenerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bir termal ve iki fotovoltaik kolektör ile desteklenen sistem 107,39 kWh-e üreterek son senaryodaki en verimli sistem olmasına rağmen üç fotovoltaik kolektör ile desteklenen sistem 4,6 yıl olan geri ödeme süresiyle en ekonomik sistem olmuştur. Elde edilen sonuçlar, termal ve fotovoltaik güneş kolektörlerinin doğru kombinasyonu ile ısı pompasını desteklemenin, evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan sistemler için enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığını açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Evsel sıcak su sistemi, güneş enerjisi, hava kaynaklı ısı pompası, TRNSYS, doğrulama.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF ENERGY-ECONOMIC ANALYSIS OF SOLAR ASSISTED AIR SOURCE HEAT PUMP FOR DOMESTIC HOT WATER

Rıza BÜYÜKZEREN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2022, 87 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

Asst. Prof. Dr. Aziz Hakan ALTUN

Asst. Prof. Dr. Sercan DOĞAN

The energy used to supply the domestic hot water need has an important share in the total energy consumed in the houses today. The efficiency of the systems used to meet this need has an undeniable importance in today's conditions where rapid increases in energy prices are experienced. Stored domestic hot water systems are very convenient for the use of renewable energy sources, and the most common systems used for this purpose are systems supported by thermal solar energy and heat pumps. In this study, firstly, the model of a domestic hot water system supported by an air source heat pump, using TRNSYS software, was validated with experimental results carried out by providing the same system and conditions in a climatic test room. By validating with four different parameters: heat pump performance coefficient, average tank temperature, heat pump inlet water temperature and heat pump outlet water temperature, the highest average deviation percentage within these parameters was calculated as 4.5%. Then, simulations were carried out by adding thermal and photovoltaic solar collectors in different combinations to the model, which was created to analyse the heat pump systems supported by different numbers and types of solar collectors and using a limited roof area for solar collectors in residences. With the results obtained from here, energy and economic analysis of all systems were made and compared with each other. In the first of four different scenarios, an annual energy consumption of 1431.44 kWh-e was used by using a system consisting of an air source heat pump and a boiler to meet the domestic hot water need of a family. In the second scenario, analysis were made by adding a solar collector to the system in the first scenario, and the system supported by a thermal collector consumed 866.73 kWh-e, making it the most energy efficient system in this scenario and the most economical with a payback period of 3.9 years. In the third scenario, simulations were made by adding two solar collectors to the system in the first scenario, and the system supported by two thermal collectors consumed 613.46 kWh-e, making it the most energy efficient system in this scenario and the most economical system with a payback period of 4.3 years. In the fourth and last scenario, analysis were carried out by adding three solar collectors to the system in the first scenario. Although the system supported by one thermal and two photovoltaic collectors was the most energy efficient system in the last scenario by producing 107.39 kWh-e, the system supported by three photovoltaic collectors was the most economical system with a payback period of 4.6 years. The results clearly show that supplementing the heat pump with the right combination of thermal and photovoltaic solar collectors significantly reduces energy consumption for systems used to meet domestic hot water needs.

Keywords: Air source heat pump, domestic hot water systems, TRNSYS, validation.

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim sırasında yardımını esirgemeyen ve tecrübesinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Ali KAHRAMAN'a ve tez izleme komitemde yer alan Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN ve Doç. Dr. M. Tahir AKKOYUNLU hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora süreci boyunca gerek fiziki imkân, gerekse kıymetli tecrübelerini esirgemeyen SOLİMPEKS A.Ş. Genel Müdürü M. Emin KEÇECİLER'e ve desteklerini esirgemeyen firma çalışanlarına, akademik tecrübesinden çokça faydalandığım Dr. Öğr. Üyesi M. Numan KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim sırasında desteklerini her zaman yanımda hissettiğim kıymetli aileme teşekkür ederim.

Bu tezi, mesleği seçmemde katkısı büyük olan rahmetli dedem Rıza BÜYÜKZEREN'e ve doktora sürecimde ahirete irtihal eden kayınpederim Ahmet GÜRSEL'e ithaf ediyorum.

Rıza BÜYÜKZEREN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	14
1.1. Evsel Sıcak Su Üretimi	15
1.1.1. Depolanan Evsel Sıcak Su	15
1.1.2. Anlık Evsel Sıcak Su	15
1.2. Soğutma Çevrimleri	16
1.2.1. Soğutma makineleri ve ısı pompaları	16
1.2.2. Tersine Carnot çevrimi	18
1.2.3. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi.....	20
1.2.4. Gerçek buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi	22
1.3. Güneş Enerjisi.....	22
1.3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi	23
1.3.3. Düz – Plaka Termal Kolektörler	25
1.3.4. Monokristal Fotovoltaik Kolektörler	26
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	28
2.1. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	28
2.2. Isıtma Amacı ile Kullanılan Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Sistemlerinin Modellenmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar	30
2.3. Isı Pompası Sistemlerinin Doğrulanması Üzerine Yapılan Çalışmalar	32
2.4. Çalışmanın Literatüre Katkısı	34

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Test Yöntemleri: Bileşen ve Tüm Sistem Testleri.....	37
3.2. Isı Pompası.....	39
3.3. Klimatik Test Odası	41
3.4. Simülasyon Modelleri.....	49
3.4.1. TRNSYS Ana Bileşenleri	50
3.4.1.1. Isı Pompası (Tip 941)	50
3.4.1.2. Depolama tankı (Tip 60c).....	51
3.4.1.3. Düz-plaka güneş kolektörü (Tip 1b).....	54
3.4.1.4. Fotovoltaik Kolektör (Tip 94a).....	55
3.4.2. Doğrulama modeli	58
3.4.3. Güneş – Isı Pompası Modeli.....	60
3.5. Performans Parametrelerinin Doğrulanması.....	63
3.6. Ekonomik Analiz	64
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	66
4.1. Doğrulama Modeli Sonuçları.....	66
4.1.1. Deneysel Doğrulama Modeli Ön Sonuçları.....	66
4.1.2. Deneysel Doğrulama Modeli Sonuçları.....	69
4.2. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Modeli Sonuçları.....	74
4.3. Ekonomik Analiz Sonuçları.....	80
4.4. Deneyin Belirsizlik Analizi	82
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
6. KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	Nakit çıkışı, €
C	Nakit girişi, €
$C_{p_{hava}}$	Havanın özgül ısısı, kJ/kg.K
$C_{p_{su}}$	Suyun özgül ısısı, kJ/kg.K
h	Özgül entalpi, kJ/kg
\dot{m}_{hava}	Havanın kütleli debisi, kg/s
$Q_{buharlaştırıcı}$	Buharlaştırıcıya olan ısı geçişi, kJ
q_c	Birim kütle için çevrimden çıkan ısı, kJ/kg
q_g	Birim kütle için çevrime giren ısı, kJ/kg
Q_H	Yüksek sıcaklıktaki cisimden veya ortamdan ısı geçişi, kJ
Q_L	Düşük sıcaklıktaki cisimden veya ortamdan ısı geçişi, kJ
$Q_{yoğuşturucu}$	Yoğuşturucudan çekilen ısı, kJ
$Q_{toplam,hava}$	Havadan transfer edilen toplam ısı, kJ
r	İskonto oranı
T_H	Yüksek sıcaklıktaki cisim veya ortam, K
T_L	Düşük sıcaklıktaki cisim veya ortam, K
$T_{su,çıkan}$	Çıkan suyun sıcaklığı, K
$T_{su,giren}$	Giren suyun sıcaklığı, K
W_c	Sistem tarafından yapılan iş, kJ
W_{fan}	Fan tarafından yapılan iş, kJ
W_g	Giren veya sistem üzerinde yapılan iş, kJ
$W_{kompresör}$	Kompresör tarafından yapılan iş, kJ
$W_{net,g}$	Net iş girişi, kJ
W_{pompa}	Pompa tarafından yapılan iş, kJ

Kısaltmalar

COP	Etkinlik katsayısı (Coefficient of Performance)
RMSD	Kök Ortalama Kare Sapma (Root Mean Square Deviation)
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	Güneş Enerji Santrali
IP	Isı Pompası
İVO	İç Verim Oranı
NBD	Net Bugünkü Değer
SM	Soğutma Makinesi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Solikombi 300 termal depolama tankına ait teknik özellikler.....	53
Tablo 3.2. Wunder ANSG 1808 düz plaka termal kolektöre ait teknik özellikler	55
Tablo 3.3. Winasol M3 330W Monokristal Fotovoltaik Kolektöre ait özellikler	57
Tablo 3.4. TRNSYS’te oluşturulan doğrulama modelinin bileşenleri.....	59
Tablo 3.5. Simülasyonu gerçekleştirilen senaryolar	60
Tablo 3.6. TRNSYS’te oluşturulan güneş – ısı pompası modelinin bileşenleri	61
Tablo 4.1. Sistem bileşenleri ve maliyetleri	80
Tablo 4.2. Farklı senaryolara göre ekonomik analiz sonuçları.....	81

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. (a) Buzdolabı (b) Ev ısıtmasında kullanılan bir ısı pompası (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)	17
Şekil 1.2. Ters Carnot soğutma makinasının tesisat şeması ve T-s diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019).....	19
Şekil 1.3. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin tesisat şeması ve T-s diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)	21
Şekil 1.4. Gerçek buhar sıkıştırımlı çevrimin tesisat şeması ve T-S diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019).....	22
Şekil 1.5. Türkiye'nin yıllık ortalama global ışınım dağılımı (kWh/m ²).....	24
Şekil 1.6. Konya ili için yıllık ortalama global ışınım dağılımı (kWh/m ²)	25
Şekil 1.7. Düz - plaka termal güneş kolektörü.....	26
Şekil 2.1. PV/T destekli ısı pompası sisteminin şematik görünümü ve ölçüm noktaları (Choi et al., 2020)	29
Şekil 2.2. Konsept sistemin şematik görünümü (Kim et al., 2018)	29
Şekil 2.3. Geleneksel güneş destekli evsel su ısıtma sisteminin modellenmesi (Sterling and Collins, 2012).....	31
Şekil 2.4. PV/T destekli ısı pompası evsel sıcak su sistemi şeması ve modeli (Öztürk et al., 2021)	32
Şekil 2.5. Deneysel ve TRNSYS ortalama su sıcaklıkları (Ruiz-calvo et al., 2017).....	33
Şekil 2.6. Simüle edilen ve ölçülen sonuçların karşılaştırılması (Dannemand et al., 2020)	34
Şekil 3.1. Paralel endirekt güneş-ısı pompası görsel şeması (Hadorn, 2015).....	36
Şekil 3.2. Simülasyonları gerçekleştirilen güneş enerjisi destekli hava kaynaklı sıcak su ısı pompası sistemi şematik gösterimi	37
Şekil 3.3. Evsel sıcak su ve mahal ısıtmada kullanılan güneş-ısı pompası için tüm sistem test metodu (Haller et al., 2013)	38
Şekil 3.4. Testi yapılan 8 kW ısıtma kapasitesine sahip ısı pompası.....	40
Şekil 3.5. Isı pompası - iç görünüm	41
Şekil 3.6. Deneysel sisteme ait hidrolik şema	42
Şekil 3.7. Klimatik test odası iç üniteleri: Soğutma iç üniteleri, nemölçer, sıcaklık sensörleri, ısı pompası, boyler ve ısı pompası bağlantı boruları.....	43

Şekil 3.8. Klimatik test odası dış üniteler: Termal depolama tankı, nemlendirici, kontrol ünitesi, pompa.....	44
Şekil 3.9. Klimatik test odasını soğutmak için kullanılan dış ünite.....	45
Şekil 3.10. Termal depolama tankını soğutmak için kullanılan dış üniteler: Soğutma dış üniteleri, termal depolama tankı dış soğutma bağlantı boruları, dış soğutma tankları ...	46
Şekil 3.11. Klimatik test odası dış görünüm.....	47
Şekil 3.12. Klimatik test odası yazılımı ekran görüntüsü.....	48
Şekil 3.13. Klimatik test odası kontrol ünitesi üzerinde yer alan PLC ekran.....	49
Şekil 3.14. Tabakalı sıvı depolama tankı.....	52
Şekil 3.15. Modellemesi yapılan termal depolama tankı.....	53
Şekil 3.16. Wunder ANSG 1808 düz plaka termal kolektör	54
Şekil 3.17. Winasol M3 330W monokristal fotovoltaik kolektör.....	57
Şekil 3.18. Hava kaynaklı ısı pompası ve boylerden oluşan evsel sıcak su sisteminin TRNSYS doğrulama modeli.....	58
Şekil 3.19. Konya ili için 1929-2020 yılları arasındaki aylık ortalama iklim verileri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü)	59
Şekil 3.20. Hava kaynaklı ısı pompası, boyler termal ve fotovoltaik kolektörlerden oluşan evsel sıcak su sisteminin TRNSYS modeli.....	61
Şekil 3.21. Günlük sıcak su tüketim profili (246 litre/gün).....	62
Şekil 4.1. Isı pompası performans katsayısı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.2. Isı pompası giriş sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.3. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.4. Boyler ortalama sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.5 Isı pompası performans katsayısı için ölçülen ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.6. Isı pompası giriş sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.7. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması.....	72

Şekil 4.8. Boyler ortalama sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması	73
Şekil 4.9. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Mart)	74
Şekil 4.10. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Haziran)	75
Şekil 4.11. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Eylül)	76
Şekil 4.12. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Aralık).....	77
Şekil 4.13. Farklı senaryolara göre yıllık enerji üretim ve tüketimi (kWh-e) *:Üretim ve tüketim değerleri göz önünde bulundurulduğunda en verimli sistem.....	78
Şekil 4.14. kWh-e cinsinden farklı sistemlere göre aylık enerji üretimi ve tüketimi	79

1. GİRİŞ

Geçen yüzyılda, enerji ihtiyacında dünya çapında önemli bir artış olmuştur ve halen enerjinin belirleyici arzı kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtlardır. Fosil yakıt kullanımını azaltmak için alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır ve bu noktada, güneş enerjisi önemli bir alternatif kaynaktır (Buker and Riffat, 2016)(Yalun et al., 2020). Su ısıtma, enerji sektöründe önemi giderek artan bir tüketim alanıdır ve günlük hayatta kilit bir rol oynamaktadır. Binaların toplam enerji kullanımında geçmişte çok küçük bir paya sahip olması nedeniyle, yüksek verimli evsel sıcak su üretimi ve dağıtımı ile ilgili faaliyetler çok uzun süredir ihmal edilmiş ve geride bırakılmıştır. Son yıllarda mahal ısıtma, havalandırma ve aydınlatma gibi alanlarda enerji kullanımı sürekli olarak azaldığından, evsel sıcak su kullanımı kilit enerji faktörlerinden biri olarak son yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu durum, verimli evsel sıcak su alanındaki faaliyetlerin güçlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Pomianowski et al., 2020). Su ısıtma binalar için mahal ısıtma, iklimlendirme ve aydınlatmadan sonra gelen en çok enerji tüketen alandır (Zou et al., 2017)(Lyden and Tuohy, 2022)(Ruschenburg et al., 2013). Avrupa'da ısı üretiminin büyük bir çoğunluğu sera gazlarının artmasına neden olan fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır (Poppi et al., 2018). Isı pompası, yenilenemeyen karbon açısından zengin kaynak kullanımını azaltmak veya sınırlamak için ters Carnot çevrimini kullanan bir makinedir. Termal kolektörler ve ısı pompası sistemlerinin kombinasyonu, evsel sıcak su ihtiyacını karşılama ve mahal ısıtması için kullanılmaktadır. Son yıllarda ısıtma ve soğutma amaçlı ısı pompası sistemlerine artan bir ilgi vardır (Fan et al., 2021). Güneş - ısı pompaları üzerine mevcut literatür kapsamlıdır. Özellikle farklı tipteki güneş - ısı pompalarının verimlilikleri, yazılım araçları ve deneysel doğrulama çalışmalarını konu edinen çalışmalara son dönemlerde ilgi oldukça yoğundur (Lee et al., 2022). Bu çalışmada, son yıllarda artan enerji fiyatları da göz önünde bulundurularak, farklı güneş kolektörü kombinasyonlarıyla desteklenmiş bir hava kaynaklı ısı pompasının, evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılmasının enerji ve ekonomik analizi yapılarak, sonuçları irdelenmiştir.

1.1. Eysel Sıcak Su Üretimi

Enerjik olarak verimli kurulumlar elde etmek için evsel sıcak suyun verimli üretimi esastır. Üretim, kullanılabilir sıcak su elde etmek için birincil enerjinin dönüştürüldüğü ilk yerdir. Dönüşüm verimliliğine ve birincil enerjinin türüne bağlı olarak, bir sistem az ya da çok verimli olacaktır. Günümüzde, tek başına veya ortak üretim olarak evsel sıcak su üretmek için birçok teknolojik olanak bulunmaktadır. Bu bölümde evsel sıcak su üretimine yönelik iki ana yöntem, bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları açıklanacaktır.

Bu çalışmada, aşağıda da belirtileceği gibi yenilenebilir enerji sistemleri ile desteklenme imkânı sağlayan depolanan evsel sıcak su sistemi kullanılmıştır ve sistem ısı pompası ve güneş kolektörleriyle desteklenmiştir.

1.1.1. Depolanan Eysel Sıcak Su

Eysel sıcak su elde edilirken, sıcak su bir depolama tankı vasıtasıyla depolanarak bu depodan sıcak su ihtiyacı karşılanıyor ise depolanan evsel sıcak su sistemleri olarak adlandırılır. Aşağıda bu sistemin avantajlarına ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

Avantajları:

- Yüksek miktarda sıcak su ihtiyacına cevap verebilir.
- Su, güneş enerjisi veya biyokütle gibi yeşil enerji kaynakları ile ısıtılabilir.
- Farklı su ısıtma yöntemlerinin bağlanmasına izin verir.
- Kazan arızalanırsa sıcak su sağlamak için acil yedek ısı kaynağı takılabilir.

Dezavantajları:

- Su kullanılmadığında bile ısıtıldığı için kullanımı daha pahalı olabilir.
- Soğuk sudan sıcak su elde etmek çok daha uzun sürebilir.
- Kurulumu daha pahalı olabilir.
- Suyun zararlı bakteri üretme olasılığı daha yüksektir.

1.1.2. Anlık Eysel Sıcak Su

Eysel sıcak su elde edilirken, sıcak su ihtiyacı kombi, şofben gibi bir cihazla anlık olarak karşılanıyor ise anlık evsel sıcak su sistemleri olarak adlandırılır. Aşağıda bu sistemin avantajlarına ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

Avantajları:

- Su yalnızca kullanıldığında ısıtıldığı için kullanımı daha ucuz olabilir.
- Soğuk sudan sıcak su elde etmek çok hızlıdır.
- Kurulumu, depolanan evsel sıcak su sistemlerinden daha ucuzdur.
- Suyun zararlı bakteri üretme şansı yoktur.

Dezavantajları:

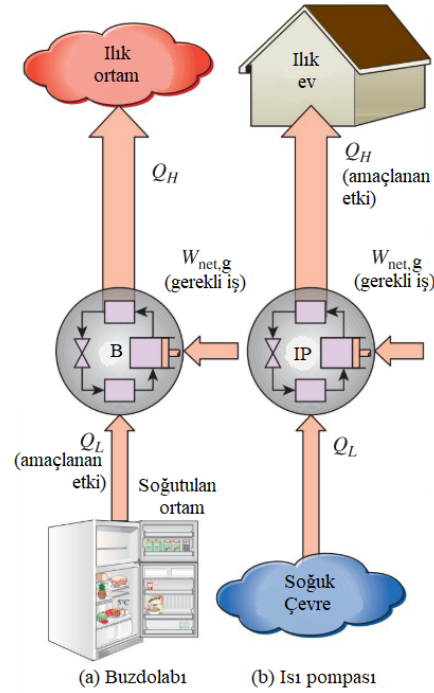
- Yüksek miktarda sıcak su ihtiyacına cevap veremez.
- Alternatif sıcak su ısıtma yöntemlerini, sisteme entegre etmek zordur.
- Su sadece gaz, petrol veya elektrik gibi yeşil olmayan kaynaklarla ısıtılabilir.
- Su ısıtıcı cihaz arızalanırsa, acil durum yedek ısı kaynağı yoktur.

1.2. Soğutma Çevrimleri

Çalışmada yer alan, depolanan evsel sıcak su sistemi, hava kaynaklı bir ısı pompası ile desteklendiği için soğutma çevrimlerinin de bu bölümde kısaca incelenmesi gereklidir.

1.2.1. Soğutma makineleri ve ısı pompaları

Isı transferi, yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğrudur. Isıyı bu şekilde aktarmak için herhangi bir cihaza veya makineye ihtiyaç duyulmaz, kendiliğinden oluşur. Tam tersi yönde ısı transferi düşündüğümüz zaman, bu akış kendiliğinden oluşamaz. Düşük sıcaklıktaki ortamdan yüksek sıcaklıktaki ortama ısıyı aktarmak için **soğutma makineleri** olarak adlandırılan cihazlara ihtiyaç duyulur. Örneğin, buzdolabı bir soğutma makinesidir.



Şekil 1.1. (a) Buzdolabı (b) Ev ısıtmasında kullanılan bir ısı pompası (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)

Isıyı düşük sıcaklıkta bir ortamdan, yüksek sıcaklıkta bir ortama aktaran bir başka cihaz da **ısı pompasıdır**. Buzdolabı ve ısı pompaları aynı döngüde çalışır ancak amaçları bakımından farklılık gösterir. Bir buzdolabının amacı, içindeki ısıyı uzaklaştırarak soğutulmuş alanı düşük bir sıcaklıkta tutmaktır. Bu ısının, daha yüksek sıcaklıkta bir ortama boşaltılması amaç değil, yalnızca gerekli işlemin bir parçasıdır. Bununla birlikte, bir ısı pompasının amacı, ısıtılmış bir alanı yüksek bir sıcaklıkta tutmaktır. Bu, kuyu suyu veya kışın soğuk dış hava gibi düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan ısının çekilmesi ve bu ısının ev gibi yüksek sıcaklıkta bir ortama verilmesiyle gerçekleşir. Bir ısı pompasına verilen iş, soğuk dış ortamdan enerji çekip, sıcak iç mekâna taşımak için kullanılır (Şekil 1.1).

Isı pompası ve soğutma makinelerinin performansları, **etkinlik katsayısı** (COP: Coefficient of Performance) ifadesi ile aşağıda belirtilen şekilde tanımlanır:

$$COP_{SM} = \frac{\text{Elde edilmek istenen}}{\text{Harcanan}} = \frac{\text{Soğutma etkisi}}{\text{İş girişi}} = \frac{Q_L}{W_{net,g}} \quad (1.1)$$

$$COP_{IP} = \frac{\text{Elde edilmek istenen}}{\text{Harcanan}} = \frac{\text{Isıtma Etkisi}}{\text{İş girişi}} = \frac{Q_H}{W_{net,g}} \quad (1.2)$$

Yukarıdaki denklemler birim zaman için de aynı şekilde yazılabilir. Denklemleri incelediğimizde, her iki performans katsayısının da birden büyük olabileceği görülmektedir. Denklem (1.1) ve (1.2)'yi beraber değerlendirildiğinde aşağıdaki ifade elde edilir.

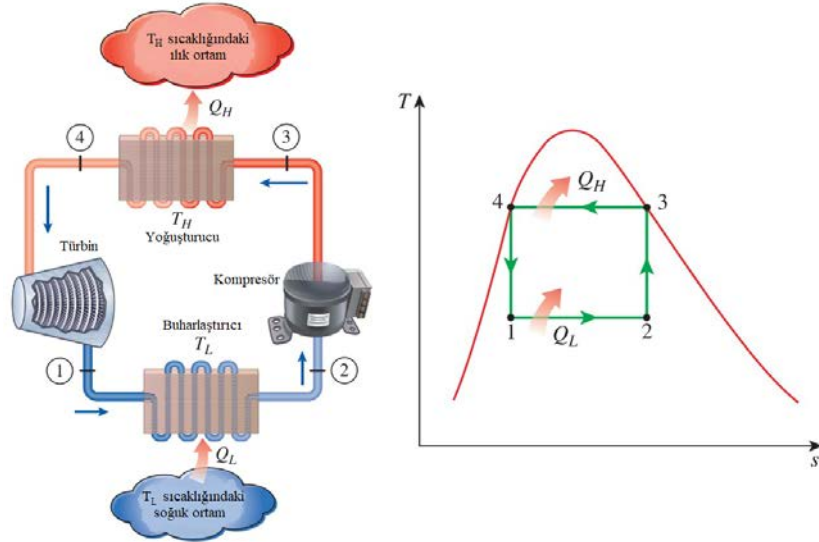
$$COP_{IP} = COP_{SM} + 1 \quad (1.3)$$

Yukarıdaki bağıntı, bir ısı pompasının etkinlik katsayısının birden büyük olduğunu ifade etmektedir. Başka bir deyişle, en kötü şartlarda bile bir elektrikli ısıtıcı vazifesini görebilecek olup, tükettiği elektrik enerjisi kadar enerjiyi ısıtılması gereken ortama verecektir. Bu durum, adyabatik bir çevrim için geçerlidir. Özellikle hava sıcaklığının çok düşük olduğu durumlarda, ortama verilecek ısının büyük bir kısmı kanallardan ve borulardan kaybolabilir ve etkinlik katsayısı 1'in altına düşebilir. Böyle durumlarda, alternatif ısıtma sistemleri (doğal gaz, fuel oil vs.) devreye alınır veya ısı pompası elektrikli ısıtıcı gibi çalıştırılır (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019).

1.2.2. Tersine Carnot çevrimi

Carnot çevrimi, iki tersinir izotermal ve iki izantropik hâl değişimlerinden oluşan, tümten tersinir bir çevrimdir. Belirlenen sıcaklık sınırları içerisinde, en yüksek ısı verime sahiptir.

Carnot çevrimindeki tüm hâl değişimleri izantropik olduğu için, bunların her biri ters yönde de gerçekleşebilir. İlgili hâl değişimleri ters yönde gerçekleştiğinde, T-s diyagramında saat yönünün tersine işleyen bir çevrim elde edilir (Şekil 1.2). Elde edilen bu çevrim **tersine Carnot çevrimi** olarak adlandırılır.



Şekil 1.2. Ters Carnot soğutma makinasının tesisat şeması ve T-s diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)

Doyma bölgesinde bulunan bir soğutkan, 1 durumundan 2 durumuna geçerken, T_L sıcaklığında bulunan soğuk ortamdaki izotermal olarak ısı alır. Daha sonra kompresörde izantropik olarak sıkıştırılarak 3 durumuna geçer. 4 durumuna geçişte ise, sıcak ortama izotermal olarak ısı verilir ve türbinde izantropik olarak genişleyerek 1 durumuna geri dönerek çevrimi tamamlar. Buharlaştırıcı ve yoğusturucuda gerçekleşen hâl değişimleri gerçeğe oldukça yakın olmakla beraber, kompresör ve türbinde gerçekleşen 2-3 ve 4-1 hâl değişimlerinin gerçekleşmesi pek mümkün değildir. 2 noktasında sıvı-buhar olarak bulunan akışkanı sıkıştırmak için iki evreli bir kompresör gerekir ve izantropik olarak gerçekleştirilemez. Öte yandan, türbinde gerçekleşen hâl değişimi sırasında sıvı oranı yüksek olan soğutkanın türbinde genişmesi gerekir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çevrimin gerçek cihazlarda uygulanamayacak hayali bir çevrim olduğu kabul edilir ve gerçek güç çevrimlerinin karşılaştırılabileceği bir standart vazifesini yerine getirir.

Carnot soğutma makinelerinin ve ısı pompalarının etkinlik katsayıları, sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$COP_{SM,carnot} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (1.4)$$

$$COP_{IP,carnot} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \quad (1.5)$$

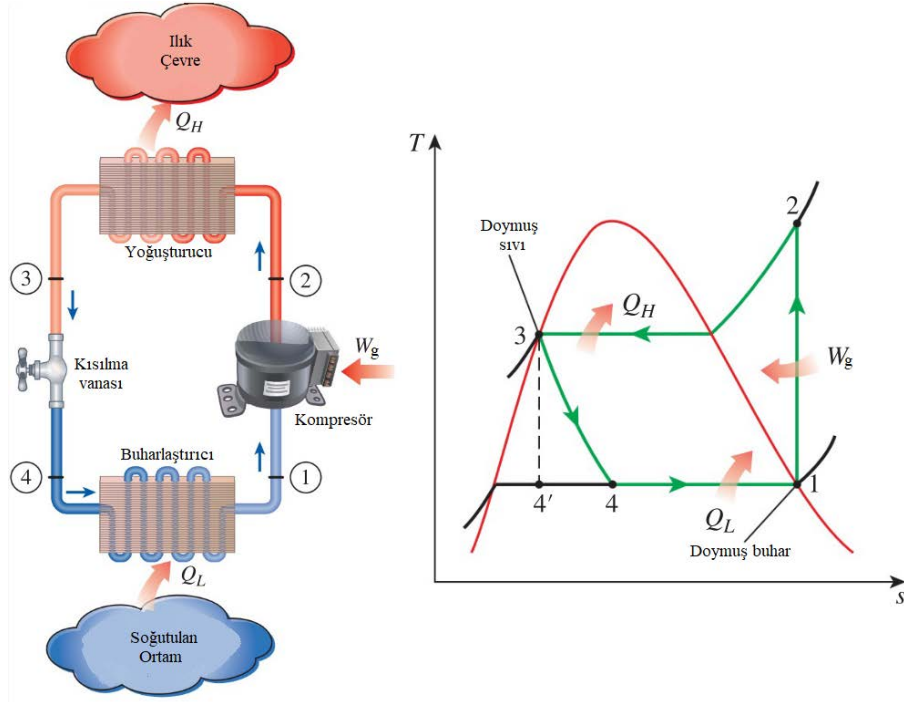
Bu ifadelerde, T_L 'nin yükselmesi ve T_H 'in düşmesi, yani aradaki sıcaklık farkının azalması her iki etkinlik katsayısını da yükseltmektedir. Carnot çevrimi, iki belirli sıcaklık arasında çalışan en verimli soğutma çevrimidir. Bu çevrimin, soğutma makineleri ve ısı pompalarını anlamak için ilk başta incelemek faydalıdır. Eğer bu çevrimde çalışabilecek makineler olsaydı, en yüksek etkinlik katsayısına sahip makineler olurlardı. Fakat yukarıda da belirtildiği üzere, hayali bir çevrim olarak kabul edilir ve gerçek güç çevrimlerinin karşılaştırılabileceği bir standart vazifesini yerine getirirler (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019).

1.2.3. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi

Tersine Carnot Çevriminde karşılaşılan problemlerin, kompresöre girmeden önce soğutkanın tamamen buharlaştırılmasıyla ve kullanılan türbin yerine bir genleşme valfi veya kılcal boru kullanılarak üstesinden gelinebilir. Elde edilen bu çevrime **ideal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi** denir.

Şekil 1.3'te tesisat şeması ve T-s diyagramı verilen çevrim, soğutma cihazlarında, iklimlendirme makinelerinde ve ısı pompalarında en çok kullanılan çevrim olup, toplamda dört hal değişimi içermektedir. Bu çevrimde, soğutucu akışkan kompresöre 1 halinde doymuş buhar olarak girmektedir ve izantropik olarak 2 noktasındaki basınca kadar sıkıştırılmaktadır. Kızgın buhar halinde kompresörden çıkan soğutkan, ılık çevreye ısı vererek doymuş sıvı yani 3 haline gelir ve soğutkanın sıcaklığı hâlen ılık çevre sıcaklığının üzerindedir. Daha sonra 3 halinde kısılma vanasından veya genleşme valfinden geçen soğutkanın basıncı, buharlaştırıcı basıncına kadar düşer ve soğutkanın sıcaklığı soğutulan ortamın sıcaklığının altına iner. Düşük bir kuruluk derecesiyle 4 halinde buharlaştırıcıya giren soğutkan, soğutulan ortamdan üzerine ısı çekerek doymuş buhar olan 1 haline tekrar geri gelir ve çevrim tamamlanmış olur.

“Pratik bir kural olarak, buharlaştırıcı sıcaklığındaki her 1°C artma veya yoğunlaştırıcı sıcaklığındaki her 1°C azalma etkinlik katsayısını %2-4 mertebesinde iyileştirir.” (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)



Şekil 1.3. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin tesisat şeması ve T-s diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)

Çevrimde yer alan hal değişimlerinin tamamı sürekli akışlı olarak değerlendirilir. Yapılan iş ve ısı değişimlerine göre çevrim ele alındığında, potansiyel ve kinetik enerjilerdeki değişimler çok az olduğu için ihmal edilebilirler. Böylece, birim kütle için yazılabilecek enerji denklemi şöyledir:

$$(q_c - q_g) - (w_c - w_g) = h_c - h_g \quad (1.6)$$

Yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcıda, sadece ilık çevreye ısı geçişi olur ve soğutulan ortamdan ısı çekilir. Bu elemanlarda, herhangi bir iş etkileşimi söz konusu değildir. Çevrimde yer alan kompresörde adyabatik kabul edilir. Bu şartlar altında, ideal buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimine göre çalışan bir ısı pompası ve soğutma makinesinin etkinlik katsayısı şu şekilde yazılabilir:

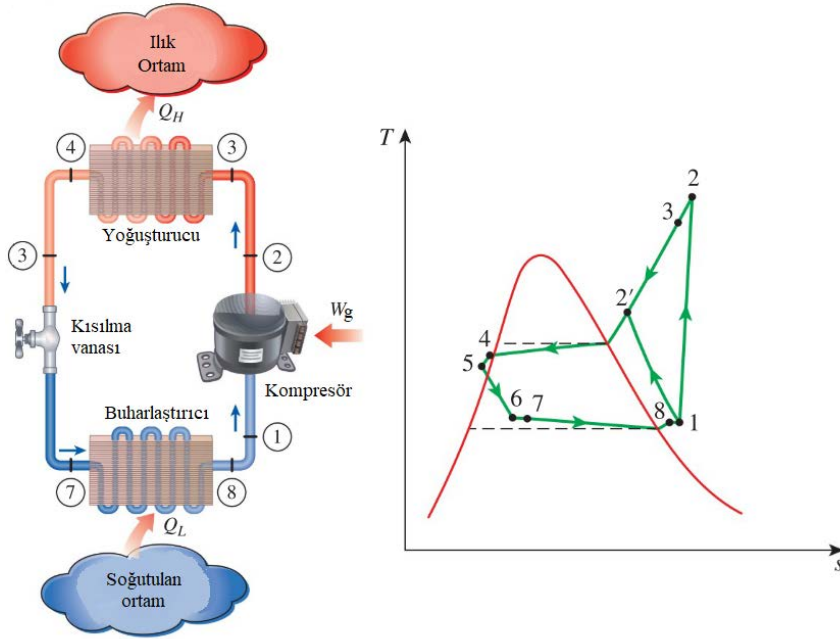
$$COP_{IP} = \frac{q_H}{W_{net,g}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (1.7)$$

$$COP_{SM} = \frac{q_L}{W_{net,g}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1.8)$$

Bu durumda, buharlaştırıcı basıncında bulunan ve doymuş buharın entalpisi h_1 , yoğunlaştırıcı basıncında bulunan doymuş sıvının entalpisi h_2 olmaktadır.

1.2.4. Gerçek buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi

Gerçek buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi, ideal buhar sıkıştırımlı çevrimden bazı noktalarda farklılıklar gösterir ve bu farklılıkların kaynağı çevrimin farklı bileşenlerinde oluşan tersinmezliklerdir. Tersinmezliklerin iki temel sebebi, çeşitli noktalarda oluşan basınç kayıpları ve çevreyle yapılan ısı alışverişidir. Gerçek buhar sıkıştırımlı çevrimin tesisat şeması ve T-S diyagramı Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4. Gerçek buhar sıkıştırımlı çevrimin tesisat şeması ve T-S diyagramı (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019)

1.3. Güneş Enerjisi

Çalışmada yer alan senaryolara göre, hava kaynaklı ısı pompası, termal ve fotovoltaik paneller ile desteklendiği için güneş enerjisinin bu bölümde kısaca incelenmesi gereklidir. Senaryolarda kullanılacak olan konum ve kolektör tipine göre bu bölümün içeriği belirlenmiştir.

Dünyada artan nüfus ve teknolojik gelişmeler nedeniyle enerji talebi hızla artmaktadır. Bu nedenle, gelecekte ortaya çıkacak enerji talebi için güvenilir, ekonomik ve sonsuz yenilenebilir enerji kaynağına yönelmek önemlidir. Güneş enerjisi endüstrisi, enerjiye olan yüksek talep nedeniyle tüm dünyada istikrarlı bir şekilde gelişmektedir. Ayrıca, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla kullanılabilirlik, maliyet etkinliği, erişilebilirlik, kapasite ve verimlilik açısından üstün olduğu için gelecekteki enerji talebi

için kesinlikle en iyi seçenek olacaktır (Kannan and Vakeesan, 2016). Aşağıda güneş enerjisinin avantajlarına ve dezavantajlarına yer verilmiştir (Öztürk et al., 2021).

Avantajları:

- Yenilenebilir bir enerji çeşidi olması açısından, çevreci ve yeşil bir enerji kaynağıdır.
- Tükenmeyen bir enerji kaynağıdır.
- Termal ve elektrik enerji ihtiyacı olan birçok lokal uygulama için oldukça uygulanabilir bir enerji kaynağıdır.
- Elektrik enerjisi üreten santraller arasında, güneş santralleri ekonomik olarak en avantajlı yatırımlar arasındadır.
- İşletme olarak, en az riske sahip sistemlerdendir.
- İşletme ve bakım maliyetleri düşüktür.

Dezavantajları:

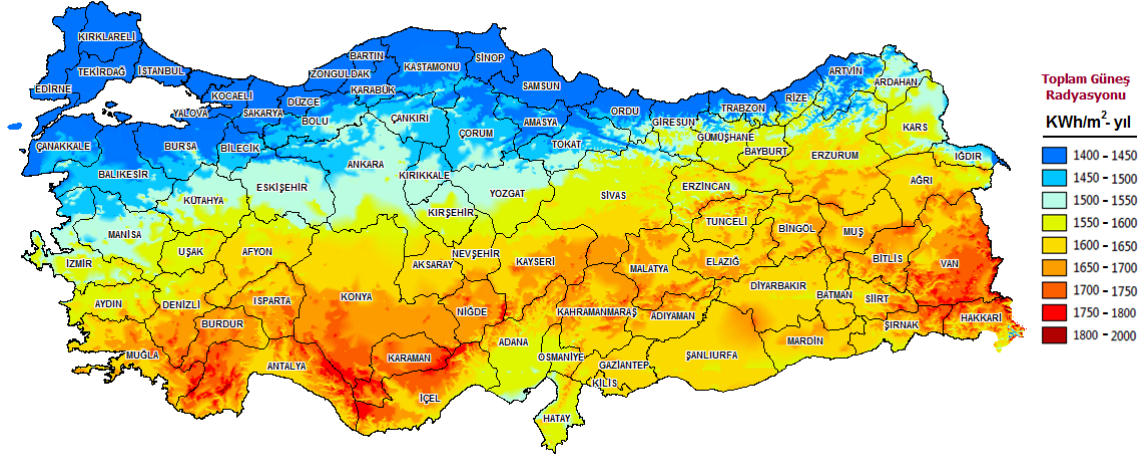
- Güneşin batışından doğumuna kadar ve bulutlu havalarda kararlı değildir.
- Kış aylarında güneş radyasyonunun düşük olmasından dolayı, enerji depolama sistemi veya şebeke bağlantısı gereklidir.
- Şebekeden bağımsız güneş enerji santralleri için akü depolama gereklidir. Bunların kullanım sürelerinin oldukça az olmasından dolayı, ek yatırım maliyetlerine ihtiyaç duyulur.
- Kum, toz, kar gibi çevresel etkenler vasıtasıyla, güneş panellerinin yüzeyleri kirlenerek, enerji üretimlerinde düşüşler yaşanmaktadır.
- Güneş enerji santralleri için, çatı veya çorak arazi gibi geniş kurulum alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

1.3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle önemli derecede güneş enerji potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. TEİAŞ’a ait rapora göre 2022 Ocak ayı sonundan itibaren Türkiye’de 7881,1 MW kapasiteye sahip 8482 tane GES bulunmaktadır. TÜİK verilerine göre Türkiye’de bulunan toplam bina sayısı 9,1 milyon adet olup, bunların %87’si konut olarak geçmektedir. Ülkemizde, her yıl toplam bina sayısına yaklaşık olarak 100.000 adet yeni bina eklenmektedir ve bu binaların çatıları kullanılarak gelecek on yıl

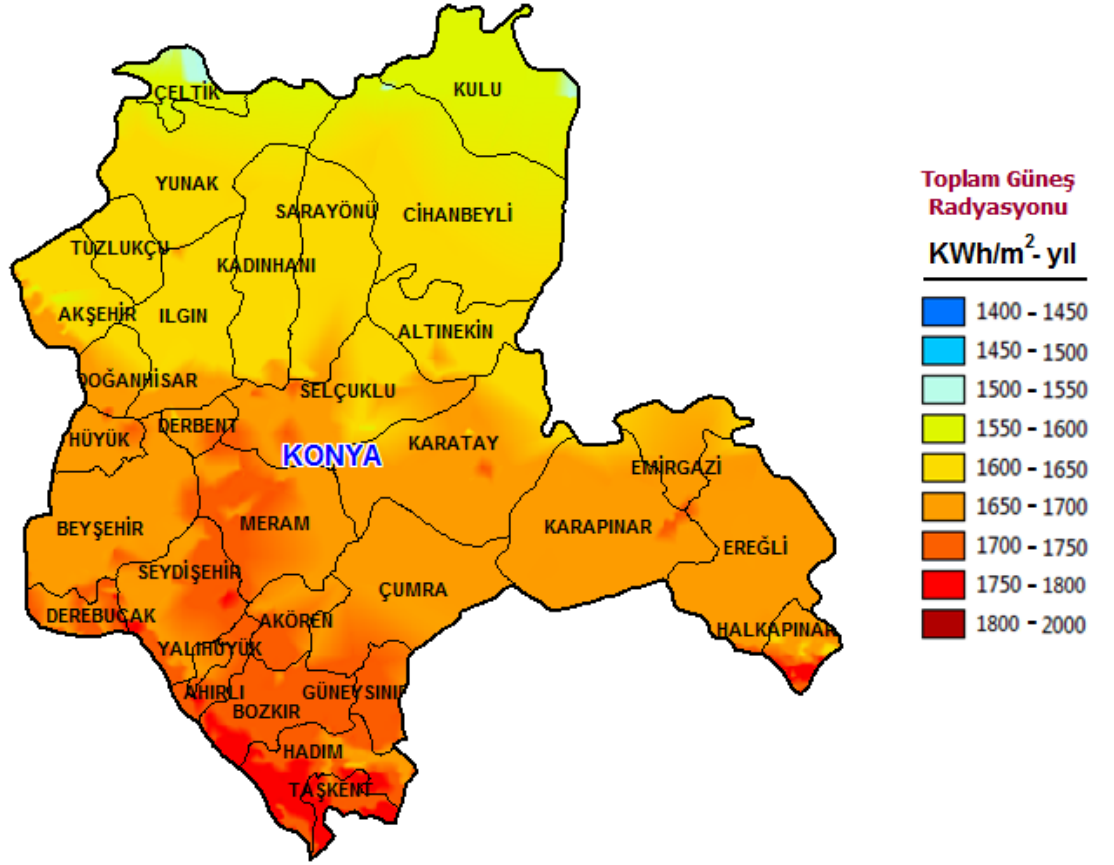
içerisinde 2000 – 4000 MW seviyelerinde güneş enerji santrali kurulabileceği tahmin edilmektedir ('Yenilenebilir Enerji - Güneş', n.d.).

Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre, toplam güneşlenme süresi yıllık olarak 2741.07 saat iken, toplam yıllık ortalama güneş radyasyonu değeri 1527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA'da yer verilen yıllık ortalama global güneş radyasyonu dağılımı Şekil 1.5'te verilmiştir ('Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası', n.d.).



Şekil 1.5. Türkiye'nin yıllık ortalama global ışınım dağılımı (kWh/m²)

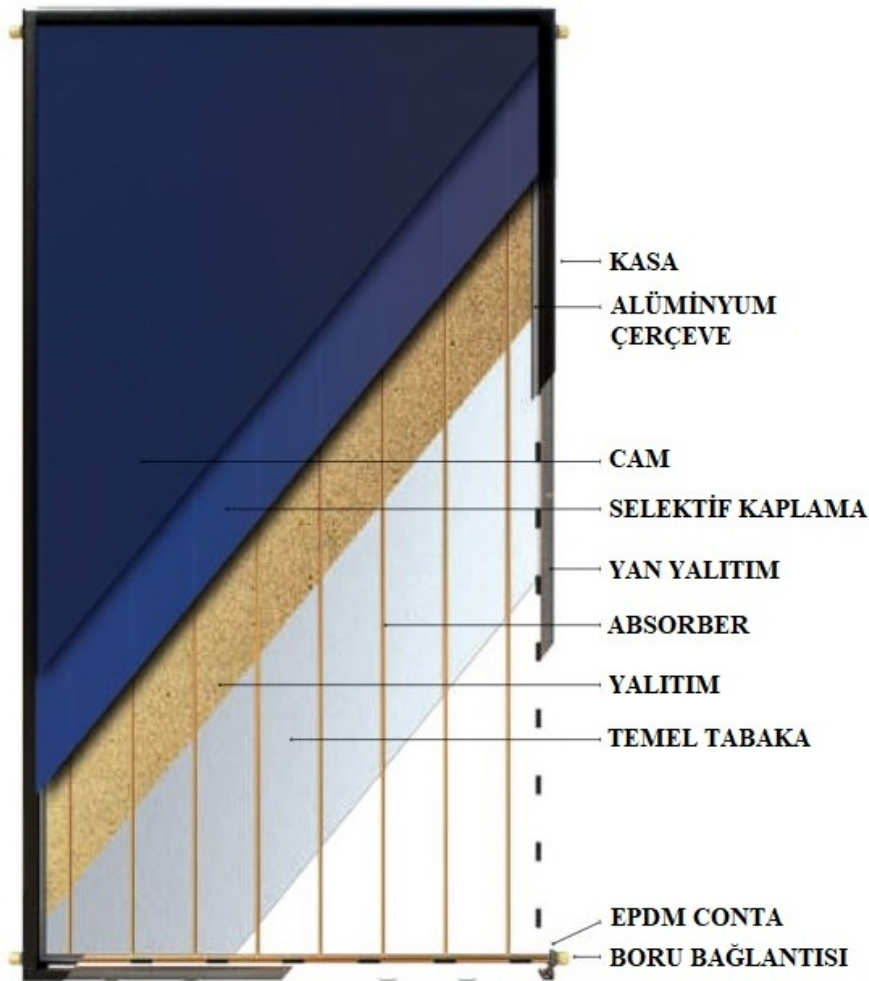
Aynı şekilde GEPA'da yer verilen verilere göre Konya ili için, toplam güneşlenme süresi yıllık olarak 2858,4 saat iken, toplam yıllık ortalama güneş radyasyonu değeri 1690,92 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA'da yer verilen Konya ili için yıllık ortalama global güneş radyasyonu dağılımı Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Konya ili için yıllık ortalama global ışınım dağılımı (kWh/m²)

1.3.3. Düz – Plaka Termal Kolektörler

Termal kolektörlerin birçok çeşidi olmasına rağmen, bu bölümde sadece düz – plaka termal kolektörlere yer verilmiştir. Termal güneş enerjisi uygulamalarında en çok tercih edilen kolektör tipi olup ve bu çalışmada analizlerde kullanılan termal kolektörde düz – plaka kolektördür.



Şekil 1.7. Düz - plaka termal güneş kolektörü

Tipik bir düz – plaka termal güneş kolektörü Şekil 1.7’de verilmiştir. Güneş radyasyonu şeffaf bir camdan geçerek, yüksek absorpsiyona sahip selektif kaplama tarafından absorbe edilerek, yüzeye bağlı bulunan ince borulara aktarılır. Bu boruların içerisindeki akışkanlar tarafından soğurulan ısı depolama veya kullanım için akışkan vasıtasıyla taşınır. Kolektörün alt ve yan tarafları, ısıl kayıpları azaltmak için yalıtılmıştır. İnce borular, daha büyük çaplı borularda birleşerek akışı tamamlarlar (Kalogirou, 2004).

1.3.4. Monokristal Fotovoltaik Kolektörler

Fotovoltaik güneş kolektörleri iki ana kategoriye ayrılır: monokristal ve polikristal güneş kolektörleri. Bu çalışmada monokristal fotovoltaik kolektör kullanıldığı için, bu kolektörün başlıca özelliklerine bu bölümde yer verilmiştir.

Monokristal güneş kolektörü, monokristal güneş hücrelerinden oluşan bir paneldir. Bu hücreler, bir yarı iletken ile aynı şekilde yüksek saflıkta bir silikon kristalden

geliştirilen silindirik bir silikon külçeden yapılır. Silindirik külçe, hücreler oluşturan tabakalar halinde dilimlenir. Hücrelerin verimini arttırmak için dairesel tabakalar, sekizgen şekilli bir tabaka olarak kesilir ve bu yapısı nedeniyle benzersiz bir görünüme sahiptir. Bu hücreler aynı zamanda tek tip bir renge sahiptir.

Güneş ışığı monokristal güneş paneli üzerine düştüğünde hücreler enerjiyi emer ve karmaşık bir süreçle bir elektrik alanı oluşturur. Bu elektrik alan, voltaj ve akımı içerir ve P (güç) = V (voltaj) x I (akım) denklemince sağlanan gücü üretir. Bu güç, doğru akımla (DC) çalışan cihazlara doğrudan güç sağlamak için kullanılabilir. Bu güç ayrıca bir invertör kullanılarak alternatif akıma da (AC) dönüştürülebilir.

Monokristal güneş hücreleri, fotovoltaik özellikler sergileyen üç tip malzeme arasındadır. Diğer ikisi polikristal güneş hücreleri ve amorf veya ince film güneş panelleridir. Monokristal güneş panelleri, diğer iki panel tipine göre daha iyi sayılabilecek ve aşağıda verilen özelliklere sahiptir:

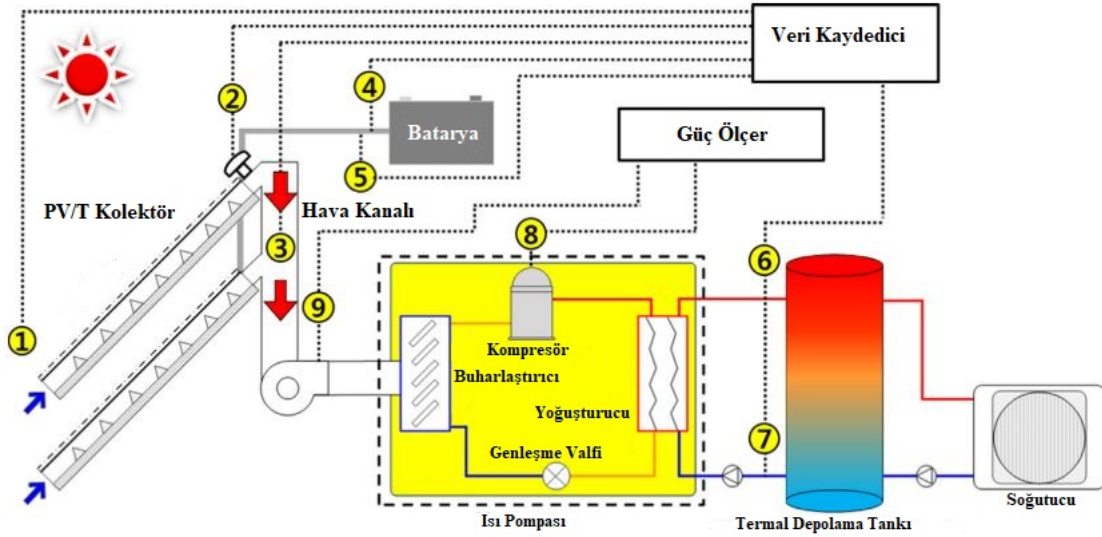
- Paneldeki bu hücreler, güneş ışınlarından daha fazla enerji toplamak için daha geniş bir yüzey alanı sunan bir piramit desenine sahiptir.
- Üst yüzey, pozitif bir elektriksel yönelime sahip olan tabana kıyasla elektriksel olarak negatif bir yönelim oluşturmaya yardımcı olan fosfor ile yayılır ve bu da elektrik alanı oluşturmaya yardımcı olur.
- Yansımayı azaltmak ve böylece emilimi arttırmak için hücreler silikon nitrür ile kaplanır.
- Üretilen elektrik, hücrelere basılan metal iletkenler aracılığı ile toplanır.
- Yukarıdaki özelliklerden dolayı, monokristal güneş hücrelerinin en önemli avantajı, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinin diğer iki tip kolektörden daha yüksek verimle yapılıyor olmasıdır.
- Bu paneller 30 yıla kadar uzun ömre sahiptir.
- Bu paneller, daha fazla ısı direncine sahiptir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

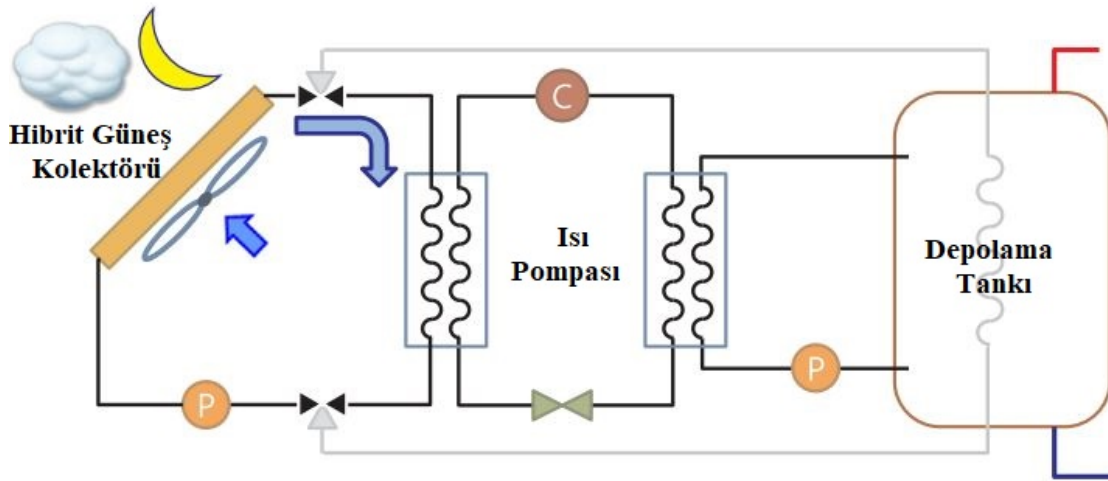
Bugüne kadar, güneş enerjisi destekli ısı pompaları ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır. Yapılan bu çalışmalar arasında, mevcut çalışmaya konu olarak en yakın olan çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir. Kaynak araştırması bölümü dört farklı başlıkta incelenmiştir. İlk bölümde genel olarak literatürde yer alan güneş destekli ısı pompalarının evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak veya diğer ısıtmalar için kullanıldığı sistemlerin incelendiği çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde ise ısıtma amaçlı kullanılan güneş – ısı pompası sistemlerinin modellenmesiyle ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan yazılımlar ve sonuçları incelenmiştir. Üçüncü bölümde ise, ısı pompası sistem modellerinin deneysel sonuçlarla doğrulandığı çalışmalara yer verilmiştir. Bu bölümde, çalışmalarda yer alan sistem bileşenleri, hata oranları, sapma yüzdeleri ve sonuçlarının kabul edilebilir olup olmadığı üzerinde durulmuştur. Son bölümde, çalışmanın literatüre olan katkısı ve özgünlüğü maddeler halinde verilmiştir.

2.1. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Sistemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Freeman ve arkadaşlarının (1979) yaptığı çalışma, paralel kombine sistemlerin, en pratik güneş-ısı pompası konfigürasyonu olduğunu göstermektedir ve belirli bir kolektör alanındaki termal performans, ısıtma mevsimi boyunca hem seriye, hem de çift kaynaklı sistemlere göre daha yüksektir. Choi ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, hava tipi fotovoltaik-termal güneş kolektör kullanılarak hava kaynaklı bir ısı pompası desteklenmiştir. Şekil 2.1’de verilen sistemin performansı, yalın çalışan bir hava kaynaklı



Şekil 2.1. PV/T destekli ısı pompası sisteminin şematik görünümü ve ölçüm noktaları (Choi et al., 2020) ısı pompası ile karşılaştırılmış ve performans katsayısında ortalama %3,12, maksimum %8,57 artış elde edilmiştir. Kim ve arkadaşlarının (2018) yaptığı konsept çalışmada, farklı bir hibrit panel kullanılmıştır. Kullanılan panelde, bakır borular kanatlı olarak tasarlanmış (fin-tube) ve bu boruları dış hava ile bir fan vasıtasıyla besleyen bir hava kanalı tasarlanmıştır. Sistemin özelliği, havayı kullanabildiği için gece güneş yokken de



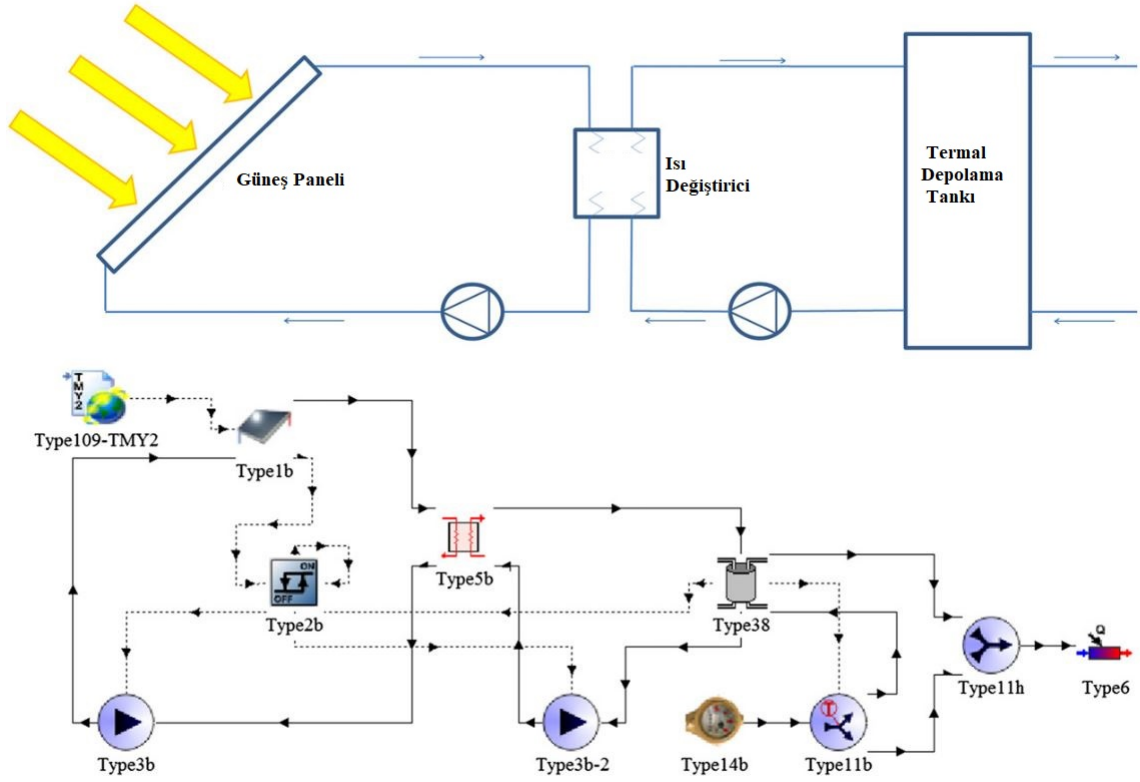
Şekil 2.2. Konsept sistemin şematik görünümü (Kim et al., 2018)

çalışabilmesidir. Şekil 2.2’de verilen sistemin performans katsayısında %5,1 artış elde edilmiştir. Besagni ve arkadaşları (2019), mahal ısıtma, soğutma ve evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla güneş – ısı pompası sisteminin performansını araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada fotovoltaik-termal kolektörü ile desteklenen, hava ve su kaynaklı ısı pompaları kullanılmıştır. Buz çözme (de-frost) döngüsünü önlemek

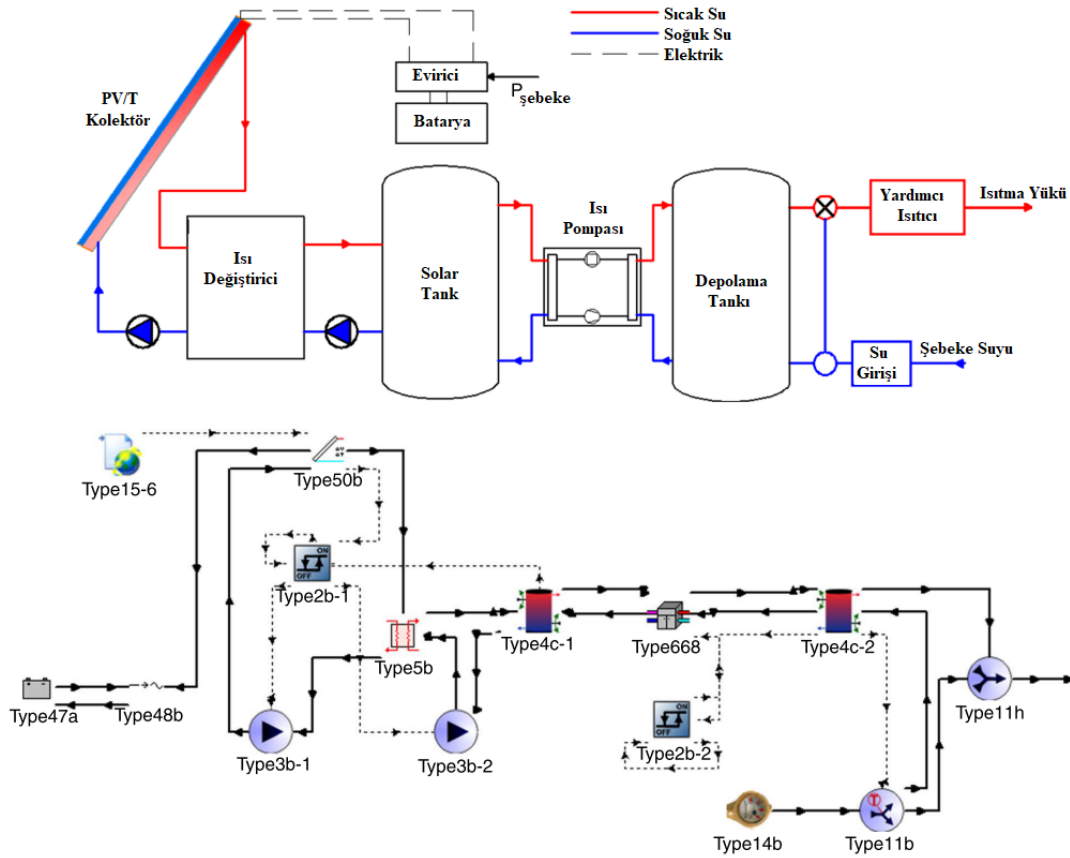
amacıyla, su kaynaklı güneş – ısı pompası sistemlerinin kullanılması araştırmacılar tarafından tavsiye edilmiştir.

2.2. Isıtma Amacı ile Kullanılan Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Sistemlerinin Modellenmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Gelişen modelleme sistemleri ile birlikte araştırmacılar, çalışmalarında sistem performansını modellemek için çeşitli yazılım ve araçlar kullanmaya başladılar. Ma ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada, endirekt genleşmeli güneş-ısı pompası sistemlerinde akışkan olarak R410A ve CO₂ kullanılarak, soğuk iklimlerde TRNSYS ve EES tabanlı performans testleri yer almıştır. Sonuç olarak 50 m² kolektör alanının altında R410A daha verimli çalışmış, bu değerin üzerinde ise CO₂'nin daha verimli çalıştığı görölmüştür. Huan ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, paralel ve seri endirekt güneş-hava ısı pompası performansları deneysel doğrulamasını yaparak TRNSYS modelinde incelemişlerdir. Yıllık performanslar değerlendirildiğinde, paralel endirekt güneş-hava ısı pompasının daha iyi performans sonuçları verdiği görölmüştür. Seri endirekt güneş-hava ısı pompası sadece kış şartlarında paralelden daha yüksek verimde çalışmıştır. Jonas ve arkadaşları (2017) güneş termal ve yer altı beslemeli ısı pompaları için TRNSYS programı kullanmış, 3 farklı bölge için simölasyon ve performans analizi yapmışlardır. Çalışma sonucunda, güneş-hava ısı pompası yüksek enerji performansı ve düşük elektrik ihtiyacı sebebiyle tavsiye edilen sistem olmuştur. Sterling ve arkadaşları (2012) evsel sıcak su sistemleri üzerine TRNSYS kullanılarak bir fizibilite analizi yapmışlar ve modellemeleri şekil 2.3'te verilmiştir. Elektrik tabanlı, güneş kolektör beslemeli, tek depolu ve güneş



Şekil 2.3. Geleneksel güneş destekli evsel su ısıtma sisteminin modellenmesi (Sterling and Collins, 2012) kolektör & ısı pompası beslemeli, çift depolu üç sistemi karşılaştırmışlardır. Çift depolu, ısı pompalı sistem en verimli enerji kullanımına ve minimum yıllık bakım gideri olan sistem olarak tavsiye edilmiştir. Öztürk ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2021), Türkiye'nin iki farklı ili olan Hakkari ve Trabzon için, fotovoltaik-termal güneş kolektörü ile desteklenen ısı pompasının performansları karşılaştırılmıştır. Enerji, ekserji ve ekonomik analizlerle desteklenen analiz çalışmaları sonucunda, Hakkari'nin yıllık enerji tüketimi açısından güneş enerjisi ile desteklenmiş ısı pompaları için daha elverişli bir iklime sahip olduğu gözlemlenmiştir. Fotovoltaik – termal kolektör destekli ve çift tanka sahip ısı pompası evsel sıcak su sisteminin şeması ve modeli Şekil 2.4'te verilmiştir.

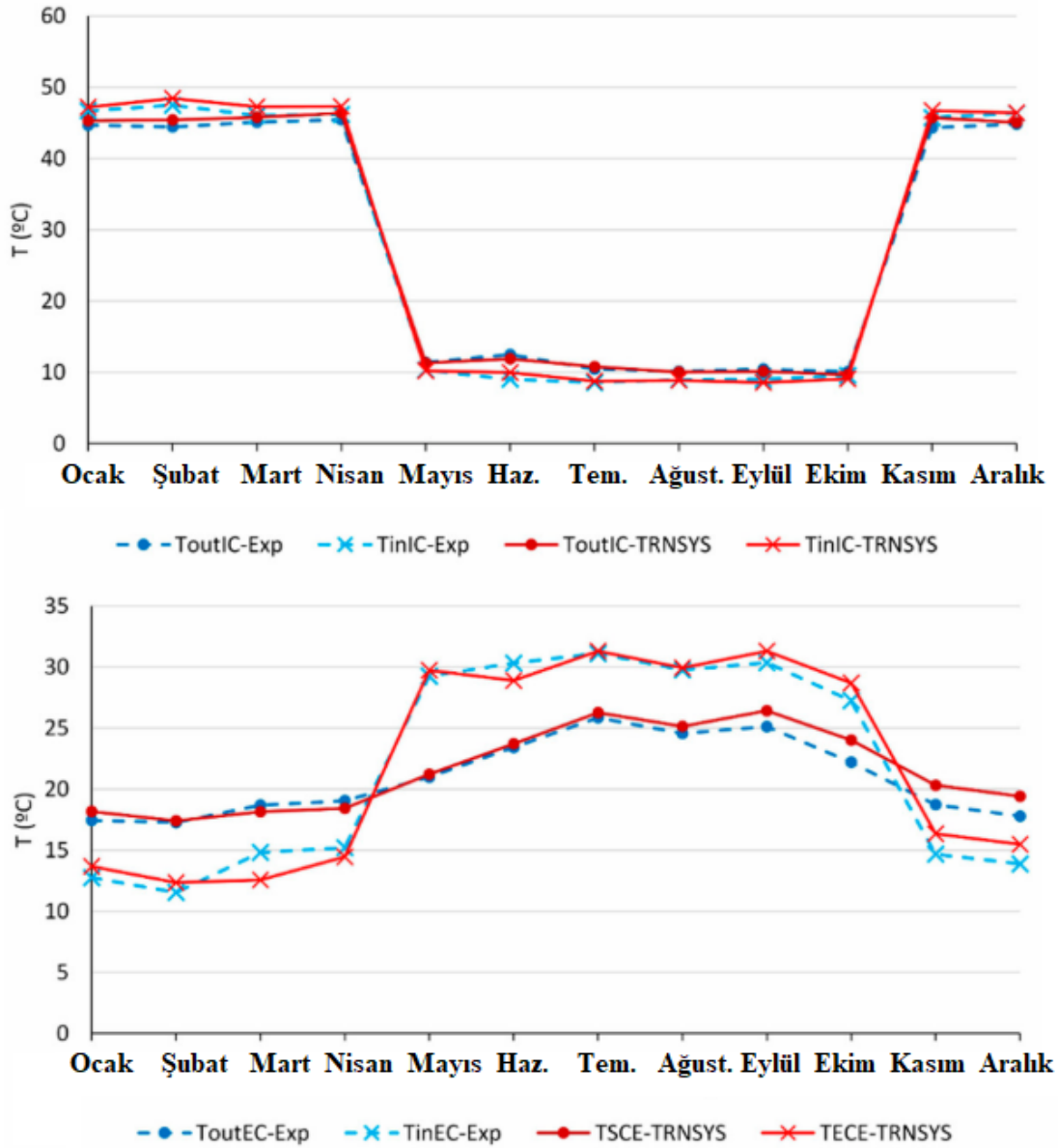


Şekil 2.4. PV/T destekli ısı pompası evsel sıcak su sistemi şeması ve modeli (Öztürk et al., 2021)

Büker ve arkadaşları (2016) ise, güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompalarının hakkında son yıllarda yapılan en kapsamlı literatür tarama çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışmada, güneş – ısı pompası sistemlerine ait çeşitli konfigürasyonlar, parametreler ve performans kriterleri karşılaştırılmıştır.

2.3. Isı Pompası Sistemlerinin Doğrulaması Üzerine Yapılan Çalışmalar

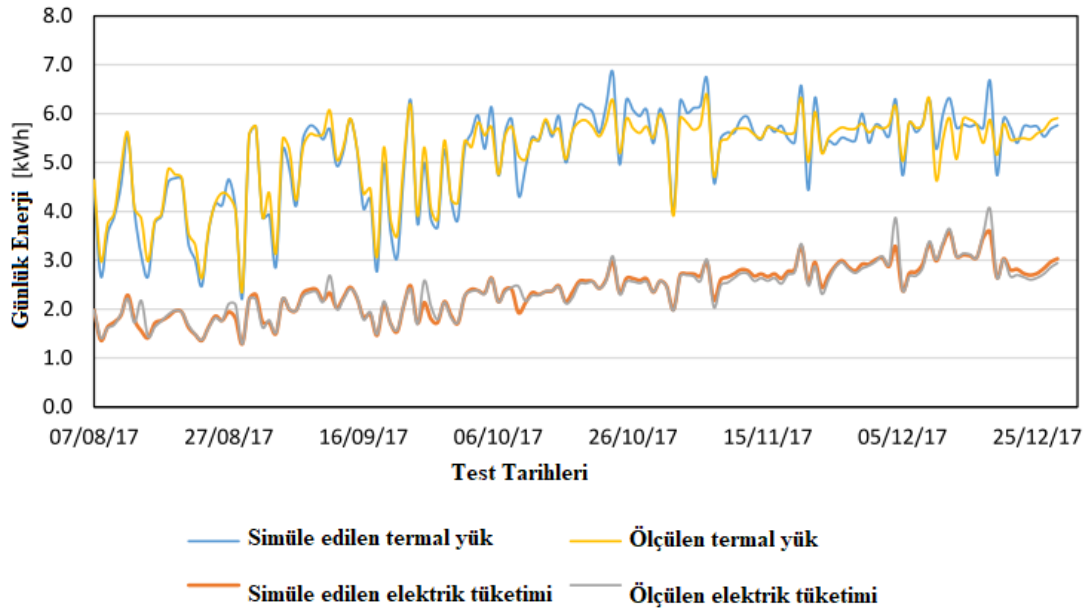
Literatürde yer alan birçok araştırmada, deneysel olarak yapılan çalışmalar ve modelleri arasındaki ilişkiler üzerinde durulmuştur. Çalışmalarda genel olarak, doğrulama yöntemleri, sapma yüzdeleri ve çalışmanın kabul edilebilirliği üzerine yoğunlaşmıştır. Janusevic ve arkadaşları (2016), TRNSYS ve MATLAB yazılımlarını kullanarak, bir güneş destekli ısı pompası performans analizi yapmışlardır. Oluşturdukları modeli deneysel veri ile de doğrulamışlardır. Analiz sonuçları ve deneysel veriler karşılaştırıldığında %11'lik kabul edilebilir bir sapma ile karşılaşmıştır. Calvo ve arkadaşları (2017) toprak kaynaklı bir ısı pompasının deneysel olarak doğrulanmış bir modelini oluşturmuştur. Çalışmada, iklimlendirilmesi beklenen bir binanın modeli ile



Şekil 2.5. Deneysel ve TRNSYS ortalama su sıcaklıkları (Ruiz-calvo et al., 2017)

yıllık bazda TRNSYS programında simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 2.5’de verilen deneysel veriler ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında %10-13 arasında değişen sapmalar tespit edilmiştir. Huang ve arkadaşları (2019) ise, doğrudan genleşmeli bir güneş destekli ısı pompasının sayısal bir modelini doğrulamak için, deneysel çalışmalar yapmışlardır. Isı pompası, kış şartlarında mahal ısıtması için kullanılmıştır. Üretilen sayısal model ile yapılan analiz sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, RMSD değeri %6’nın hemen altında hesaplanmıştır. Rasheed ve arkadaşları (2021) tarafından geliştirilen bir hava kaynaklı ısı pompası modeli bir serayı ısıtmak için kullanılmıştır. Sistem modeli TRNSYS yazılımında oluşturulmuş ve sistem sonuçları farklı parametreler ile doğrulanmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, kabul edilebilir

bir modelin ortaya koyulduğu görülmektedir. Benzer bir çalışma Dannemand ve arkadaşları (2020) tarafından da yapılmıştır. Çalışmada yer alan sistem, camsız bir hibrit fotovoltaik-termal güneş kolektörü ve çift depolama tankı ile desteklenen bir ısı



Şekil 2.6. Simüle edilen ve ölçülen sonuçların karşılaştırılması (Dannemand et al., 2020)

pompasından oluşmaktadır ve Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu çalışmada, deneysel olarak ölçülen ve simülasyonlarla tahmin edilen değerler arasında %4'ten daha az sapmalar elde edilmiştir. Korichi ve arkadaşları (2021), sahra ikliminde yer alan bir binayı soğutmak için dikey bir toprak kaynaklı ısı pompasının termo-ekonomik modellemesi ve optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışmada sistemin performans analizi yapılmış, simülasyon ve deneysel verilerin doğrulanmasında ise en yüksek hata oranı %4,9 olmuştur.

2.4. Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu doktora tezinde, öncelikle simülasyon modelini doğrulamak için deneysel bir çalışma yapılmış, daha sonra modele çeşitli bileşenlerin eklenmesiyle senaryosu oluşturulan modellerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın literatüre olan katkısı ve özgünlüğü aşağıdaki gibi sıralanabilir:

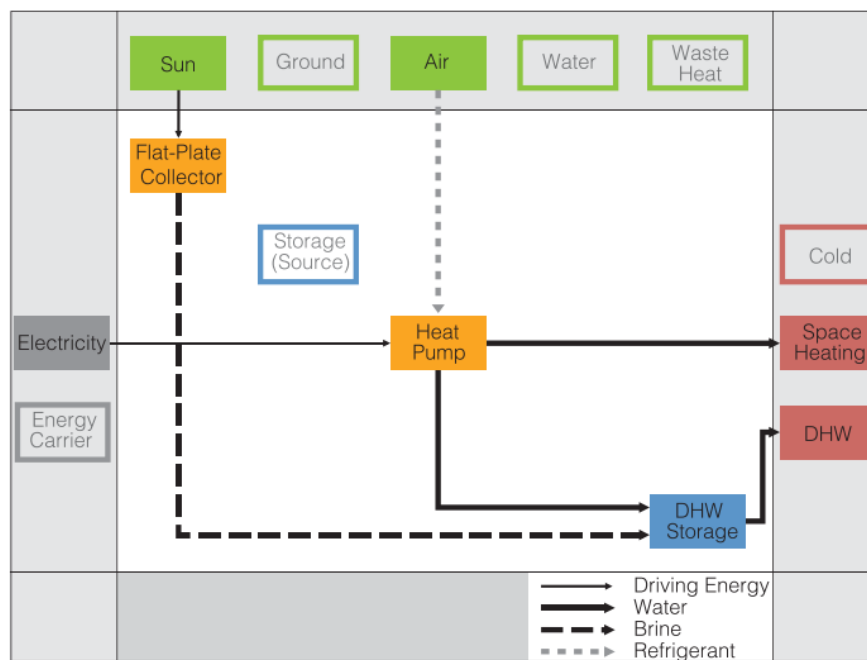
- Termal ve/veya fotovoltaik güneş kolektörleri tarafından desteklenen bir hava kaynaklı ısı pompası ile bir evin evsel sıcak su talebini karşılayarak, en uygun kolektör konfigürasyonuna ulaşmak için TRNSYS yazılımında farklı parametreler test edilmiştir.

- Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, fotovoltaik ve termal kolektörlerin hem ayrı ayrı hem birlikte yer aldığı sistemlerin performans analizleri, bir ailenin evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla yapılmıştır.
- Oluşturulan senaryolar ile Konya ili için gerçekleştirilen en kapsamlı güneş destekli ısı pompası analizi yapılmıştır.
- Deneyler ve model arasındaki ortalama hata yüzdesini en aza indirecek şekilde bir simülasyon yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

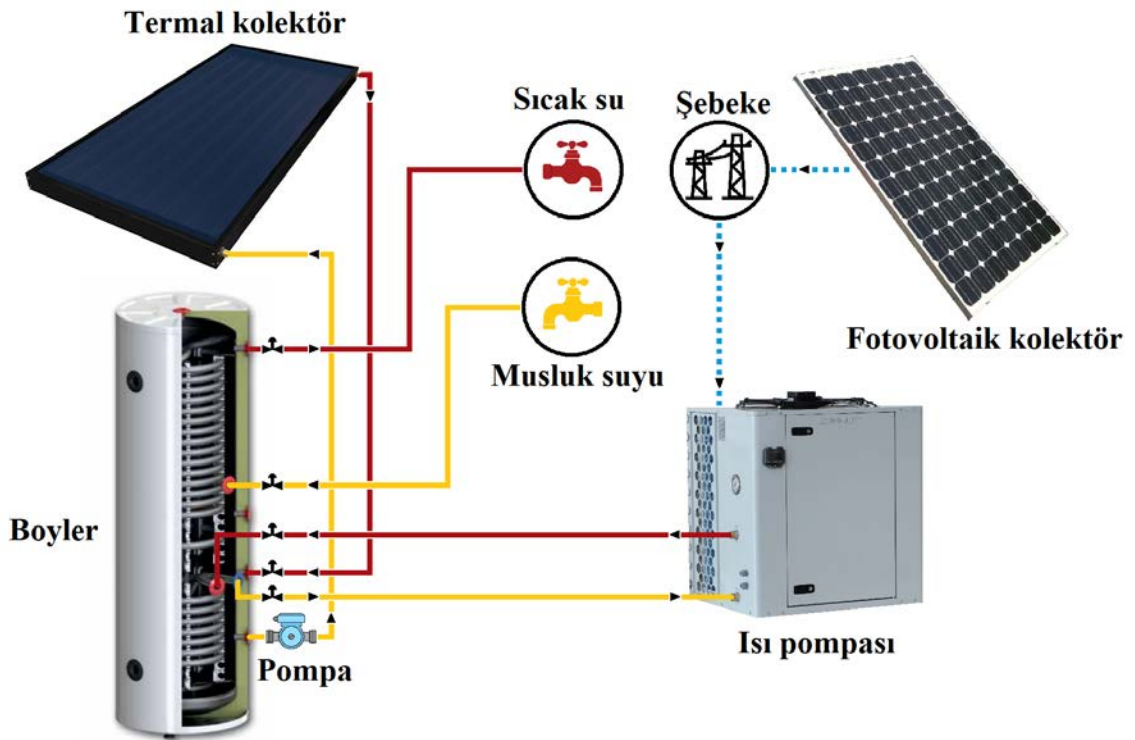
Isı pompası ve güneş enerji sistemlerinin birlikte kullanılması, su ısıtmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Bu yöntemle ilgili temel sorun, her iki sistem de ayrı ayrı özel test yöntemlerine sahip olmasına rağmen, güneş-ısı pompası sistemleri için standart bir test yönteminin olmamasıdır. Bu konuyla ilgili standartlar belirlemeyi amaçlayan bir AB projesi olan QAIST (Malenković, 2012) kapsamında, güneş-ısı pompası sistemleri için mevcut standartlardaki boşlukları da içeren bir kılavuz hazırlanmıştır. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlardan biri de, mevcut güneş enerjisi standartlarının ısı pompasına ek bir ısı kaynağı olarak nitelendirilemeyeceği belirtilmiştir. Buna ek olarak, ısı pompası test standartları şu anda güneş kolektörü bileşenlerini kapsamamaktadır.

Isı pompalarının ısı kaynağı olarak kullanıldığı güneş, yer altı kaynakları, hava, su ve atık ısı gibi kaynaklar Şekil 3.1’de verilmiştir. Güneş enerjisi destekli ısı pompalarında güneş doğrudan ve dolaylı olarak kullanılabilir. Bu çalışmada güneşten dolaylı olarak yani bir su deposu vasıtasıyla yararlanılmıştır. Isı pompaları, elektrik enerjisi ile çalışan bir kompresör yardımıyla akışkanın basıncını ve sıcaklığını artırır. Güneş-ısı pompaları bir su deposu aracılığı ile evsel sıcak su ve mahal ısıtma için, ayrıca fan-coiler yardımıyla mahal soğutma için de kullanılabilir (Esen et al., 2006).



Şekil 3.1. Paralel indirekt güneş-ısı pompası görsel şeması (Hadorn, 2015)

Güneş-ısı pompası sistemleri ile geleneksel güneş enerjili ısıtma sistemleri veya bağımsız ısı pompası sistemleri arasında bir takım farklılıklar vardır. Güneş-ısı pompası sistemleri diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha karmaşıkken, tekli ısıtma sistemleri oldukça basit donanımlara sahiptir. Ayrıca, kombine güneş enerjili ısı pompası sistemleri birden fazla ısı kaynağını hesaba katmalı ve daha karmaşık kontrol yöntemleriyle kontrol edilmelidir. Mevcut durumda, güneş-ısı pompası sistemlerinde kullanılan test prosedürleri iki temel yaklaşıma indirgenebilir. Bunlar tüm sistem testi ve bileşen testi olarak adlandırılmaktadır. Simülasyonları gerçekleştirilen ve doğrulaması tüm sistem yöntemiyle yapılan bu sistemin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



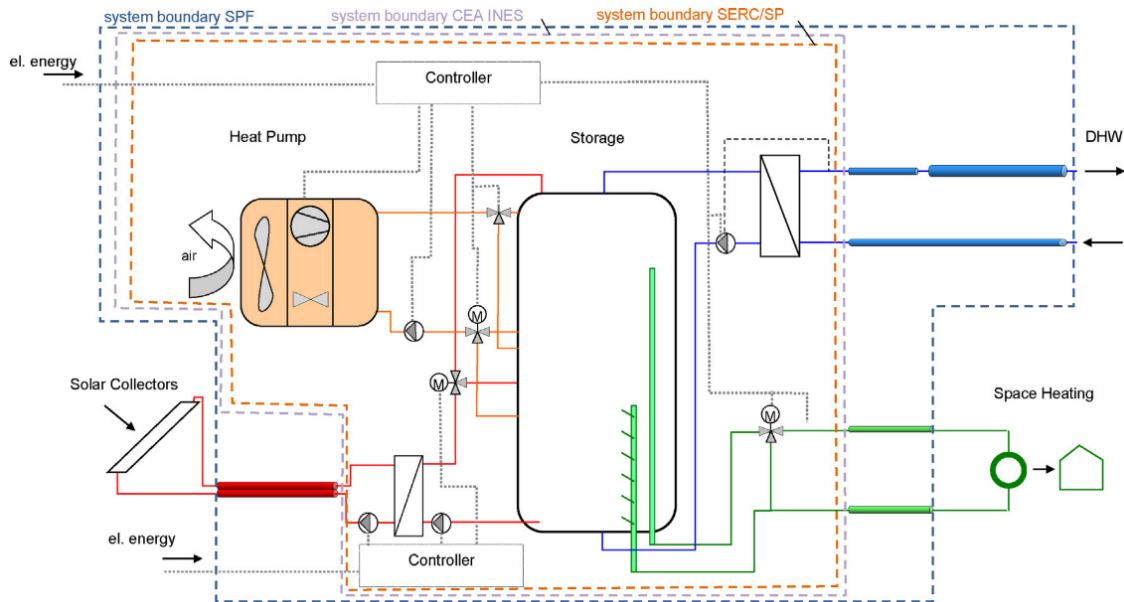
Şekil 3.2. Simülasyonları gerçekleştirilen güneş enerjisi destekli hava kaynaklı sıcak su ısı pompası sistemi şematik gösterimi

3.1. Test Yöntemleri: Bileşen ve Tüm Sistem Testleri

Güneş-ısı pompası test yöntemleri, evsel sıcak su ve mahal ısıtma amaçlarıyla kullanılan yöntemlerdir. Bazı güneş-ısı pompası sistemleri bunlara ek olarak aktif veya pasif soğutma sağlayabilir. Sistemlerin temel çalışma prensiplerine göre, açıklanan bu tüm prosedürler, bileşen testi ve tüm sistem testi olarak ikiye ayrılabilir. Bileşen test yöntemi incelendiğinde, sistemin her bir bileşeni kendi standardına göre test edilir veya o bileşenin katalog verisi kullanılır. Buna karşılık tüm sistem testi, üretici tarafından

sağlanan tüm ekipmanları içerecek şekilde sistemin tamamını kurmayı gerektirir. Yani her iki sistemde kullanılan yöntem ve sistem sınırları birbirinden farklıdır. Tüm sistem testinde sistem sınırı ve test sınırı aynı iken, bileşen testinde farklıdır. Öte yandan, bileşen testi için tel, boru veya hortum gibi bağlantı ekipmanları dikkate alınmaz, ancak yine de simülasyon testlerine dâhil edilir.

Bileşen ve tüm sistem test yöntemleri benzer ısı kaynaklarına sahiptir. Bu ısı kaynaklarından toprak ve geniş alana sahip güneş kolektörleri gibi yüksek kapasiteli ısı kaynakları, yüksek maliyetlerden dolayı laboratuvar ortamına kurulamaz. Bu sebepten ilgili ısı kaynaklarının modeli simülasyonlara dâhil edilerek, bu zorluğun üstesinden gelinebilir. Bunlara ek olarak, hava kaynaklı ısı pompalarının dış üniteleri iklimik test odalarında test edilebilir ve gerekli ölçümler yapılabilir. Bazı ısıtma sistemleri sadece evsel sıcak su ısıtmasına yönelik tasarlanır ve daha az kolektör alanı gerektirir. Bazıları ise, evsel sıcak su ve mahal ısıtmadan oluşmakta ve daha fazla kolektör alanı gerektirmektedir. Bahsi geçen bu sistemler tüm sistem test yöntemiyle laboratuvar ortamında test edilebilmektedir. Tek istisnası, geniş kolektör alanına sahip sistemlerdir ve bu sistemlerde önce kolektörün modellenmesi ve doğrulanması, sonra simülasyon aşamasında sisteme dâhil edilmesi uygun ve ekonomiktir.



Şekil 3.3. Eysel sıcak su ve mahal ısıtmada kullanılan güneş-ısı pompası için tüm sistem test metodu (Haller et al., 2013)

Pompalar, borular, vanalar gibi sistemin harici bileşenleri, evsel sıcak su veya mahal ısıtma sistemleri için bileşen test sistemi sınırında dikkate alınmaz. Bu bileşenler, sistem boyutuna ve tasarımına göre her sistem için farklıdır. Tesisatın birçok açıdan

sistem performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu parametreler tüm sistem test yöntemine dâhil edilebilir, ancak bileşen test yöntemi için yalnızca simülasyona dâhil edilebilir. Test konfigürasyonu olmadan bu tür enerjik etkileri uygun şekilde değerlendirmek zordur. Bileşen testlerinde, kontrolör test edilmiş ve kontrolör stratejisi doğru ayarlanmış ise, simülasyon ile ısı kaybı ve ek enerji tüketimi hesaplanabilmektedir. Tüm sistem testlerinde mahal ısıtma yükleri dinamik olarak simüle edilebilir. Bu nedenle, ısı yüklerinden gelen geri bildirimler ve kontrolör tepkisi ancak test sırasında değerlendirilebilir. Kontrolör yanıtı bu şekilde doğru bir şekilde kontrol edilebilir. Sonuç olarak, sistemin enerji tüketimi ve performansının ana göstergesi olan kontrolörün doğrudan ekstrapolasyon ile ayarlanması zordur. AB projesi MacSheep (www.macsheep.spf.ch), ısı yükünün tepkisini simüle etmenin ve taklit etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

3.2. Isı Pompası

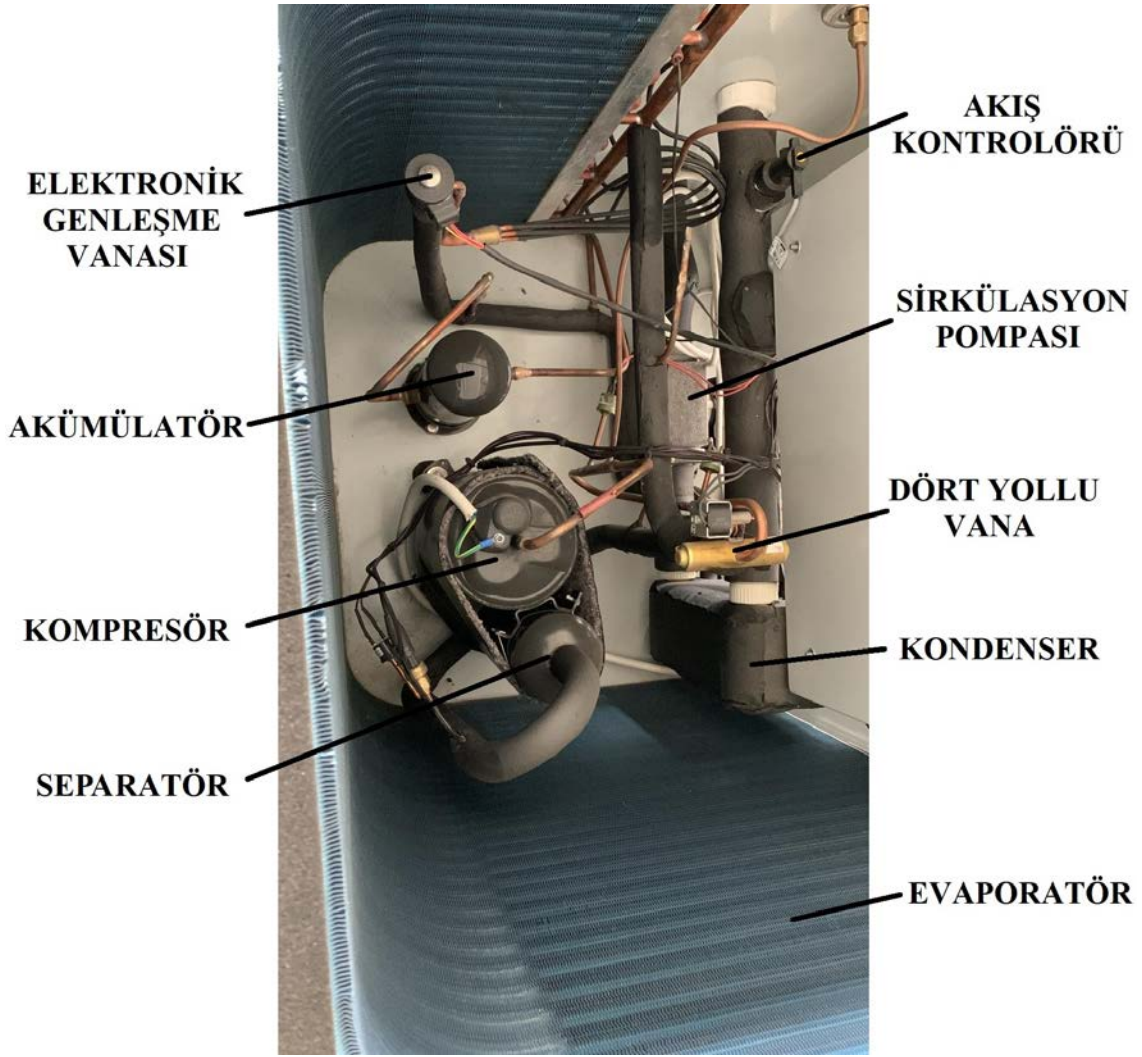
Bu çalışmada testleri gerçekleştirilen 8 kW ısıtma kapasitesine sahip ısı pompası Şekil 3.4'te verilmiştir. Evaporatör “U” şeklinde olup, kapağın bulunduğu yüzey haricindeki diğer yüzeyleri sarmaktadır. Buna ek olarak yüzey alanını arttırmak için, boru girişlerinin olduğu tarafta da evaporatörün devam ettiği görülebilir. Evaporatörün üzerinde, kanatçıkların zarar görmemesi için ve hava akışını da bozmayacak şekilde bir kapak bulunmaktadır. Isı pompasının fanı üst tarafta bulunmaktadır ve fanın üzerinde de bir kapak mevcut olup, benzer şekilde hava akışını bozmayacak şekilde tasarlanmıştır. Isı pompasına ait fan, yüksek devir sayılarında döndüğü için dışarıdan elle bir müdahale tehlikeli durumların oluşmasına yol açar. Bu durumu engellemek için, ısı pompasının üst tarafına da bir kapak yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Testi yapılan 8 kW ısıtma kapasitesine sahip ısı pompası

Isı pompasına ait kompresör, ısı değıştirici, dört yollu vana, elektronik genleşme valfi, akümülatör, sirkülasyon pompası gibi komponentlere üst taraftaki fan çıkarılarak müdahale edilebilmektedir. Bu bileşenlerin yer aldığı ısı pompasına ait iç görünüm Şekil 3.5'te verilmiştir. Sistem ısıtma modunda çalışırken, kondenserden çıkan soğutucu akışkan önce akümülatöre gelerek, tam sıvı halde elektronik genleşme valfine girmektedir. Elektronik genleşme valfinden sonra, evaporatörde dışardan ısı alarak kompresörden hemen önce seperatöre girmektedir. Seperatörün buradaki görevi, akışkanda bulunan sıvı tanecikleri ayrıştırarak kompresöre tamamen gaz halde akışkanın girişini sağlamaktır. Kompresörden çıkan, kızgın akışkan dört yollu vanadan geçerek tekrar kondensere girmekte ve çevrimi tamamlamaktadır.

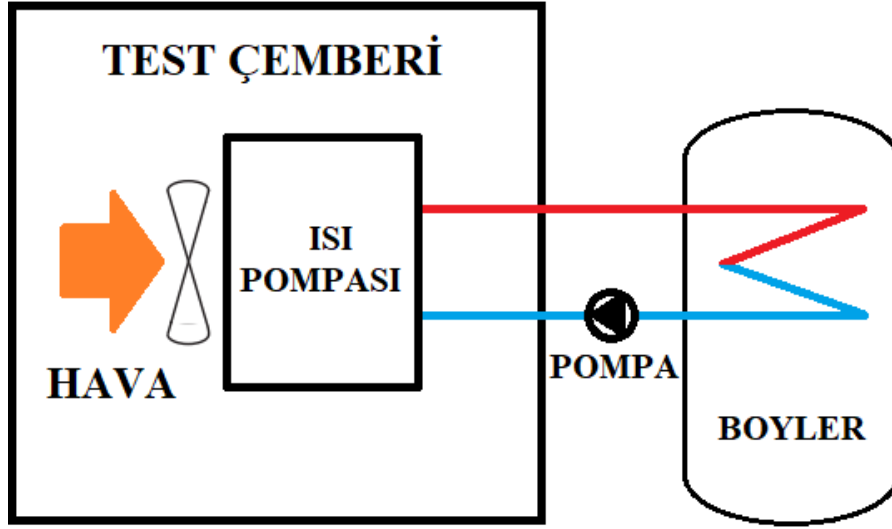
Isı pompasının standart koşullar altında belirlenen ısıtma kapasitesi 8 kW'tır ve bu kapasite değeri 7 °C ortam sıcaklığında, ısıtma suyunun 30 °C'den 35 °C'ye ısıtılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Isı pompası - iç görünüm

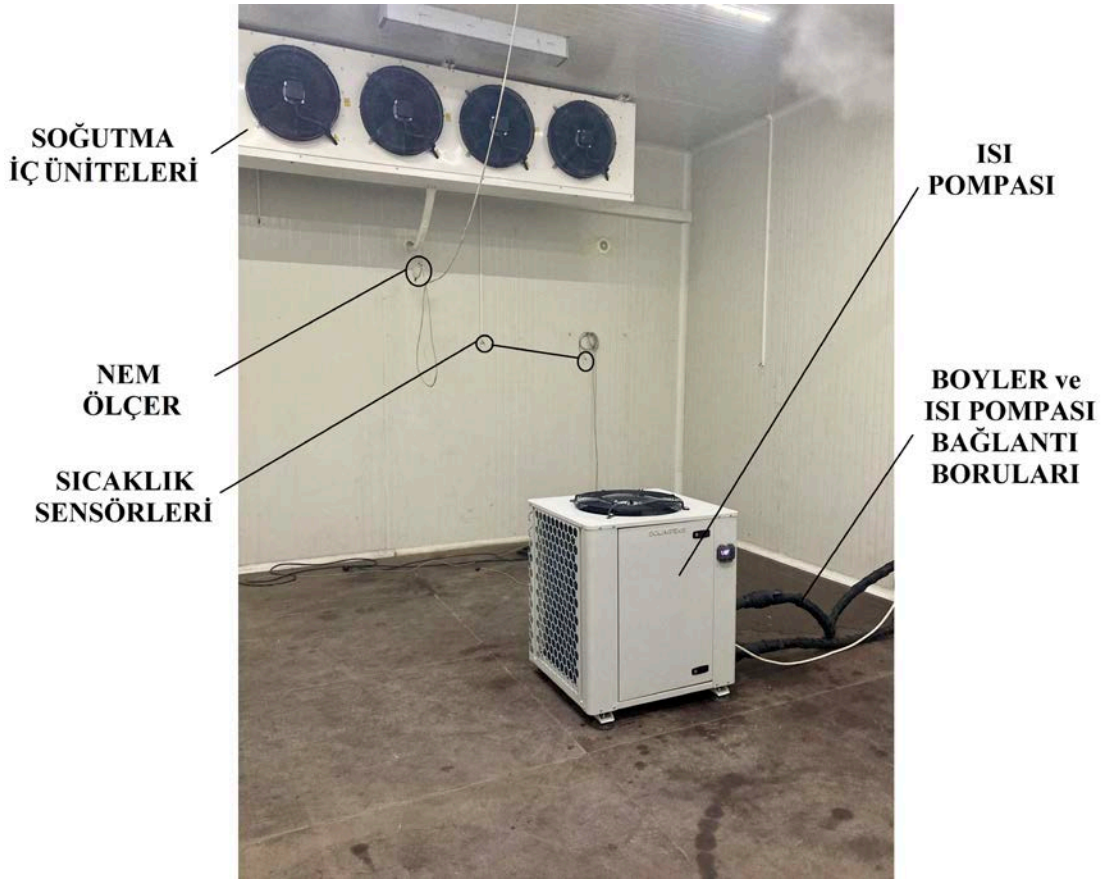
3.3. Klimatik Test Odası

Deney sistemi iklimik test odası, kontrol ünitesi, ısı pompası, boiler ve pompadan oluşmakta olup, sistemin hidrolik şeması Şekil 3.6'da verilmiştir. Soğuk su, boilerin alt kısmından çıktıktan sonra bir pompa aracılığıyla tahrik edilerek, ısı pompasına yönlendirilir. Isı pompasına giren su, buradaki ısı değiştiricisinden geçerek ısıtılır. Bu sırada ısı pompası çevrimi gerçekleşirken ortam havasının ısısı kullanılarak su ısıtılmış olur. Isınan su ısı pompasından çıkar ve kullanım için boilerlere üstten girer. Su deposunun iç yapısındaki sıcaklık dağılımı yukarıdan aşağıya doğru azalır. Aynı işlem depodan soğuk suyun ayrılmasıyla devam eder ve çevrim tamamlanarak yeniden başlar.



Şekil 3.6. Deneysel sisteme ait hidrolik şema

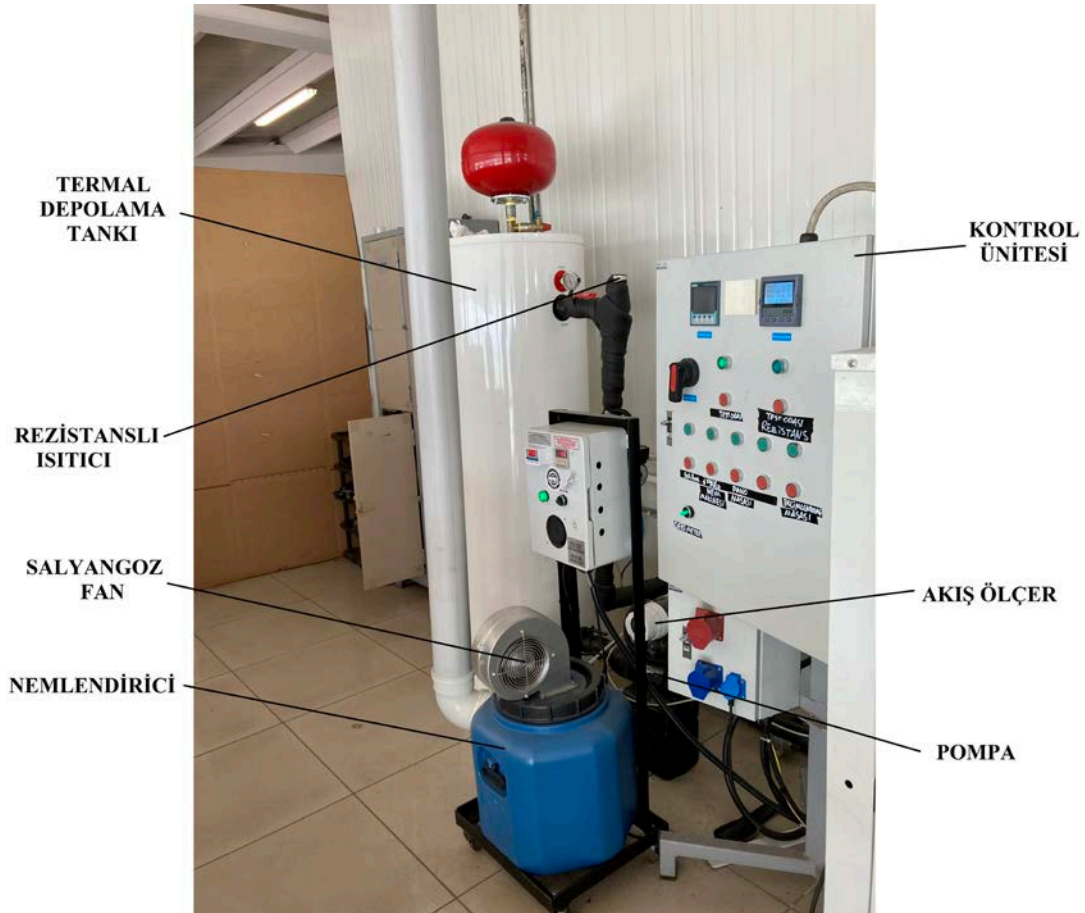
Kontrol ünitesi, bağlantı boruları, nemlendirici ve sıcaklık sensörleri gibi yardımcı elemanlar Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Boyler hacmi 270 litre olup, iki farklı ısı kaynağı ve iki farklı ek ısıtıcı eklenebilecek şekilde tasarlanmıştır. Klimatik test odası $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında ve en fazla %5 nem sapsması ile iklimlendirebilmektedir. Ortam nemi testler boyunca %75-80 arasında sabit tutulmuştur. Bunun sebebi simülasyonda kullanılan ısı pompası modelinde, nem değeri sabit girilip doğrulama yapılmış olmasıdır. Sıcaklık sensörlerinin hassasiyeti $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, her bir test verisi 15 saniye aralıklarla kaydedilmiştir. Performans doğrulama testleri için gerekli parametreler; performans katsayısı (COP), ısı pompasına giriş ve çıkış suyu sıcaklığı ve ortalama boyler sıcaklığıdır. Performans katsayısı ısı pompasından, giriş ve çıkış suyu sıcaklığı da ısı pompası giriş ve çıkışından, ortalama depo sıcaklığı ise boylerin tam orta noktasından ölçülmüştür. Sistemin tüm boruları polietilen ile izole edilmiştir.



Şekil 3.7. Klimatik test odası iç üniteleri: Soğutma iç üniteleri, nemölçer, sıcaklık sensörleri, ısı pompası, boiler ve ısı pompası bağlantı boruları

Klimatik test odasında yer alan iç üniteler Şekil 3.7’de verilmiştir. İç üniteye yer alan soğutma üniteleri, test odasını $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar soğutabilmektedir ve $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar da ısıtabilmektedir. Test odasının içerisinde birden fazla sıcaklık ve nem sensörleri bulunmaktadır. Kontrol ekranında nem ve sıcaklıkta daha kesin değerler alabilmek için, bu sensörlerin ölçtüğü tüm değerler kayıt altına alınmaktadır. Test odasının içerisinde $0,1$ hassasiyete sahip 8 adet sıcaklık sensörü ve aynı hassasiyette 2 adet nem sensörü bulunmaktadır. Ortam sıcaklığı ve nemi bu sensörlerin ölçtüğü değerlerin ortalaması alınarak belirlenmektedir. Isı pompasına gelen ve giden boruların tamamı yalıtılmış olup, giriş ve çıkışta sıcaklık sensörleri bulunmaktadır. Deneyler boyunca ölçülen ısı pompasına giriş ve çıkış su sıcaklığı değerleri, bu sensörler aracılığı ile ölçülmüştür.

Daha önce de belirtildiği gibi test odası $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısıtılabilir. Klimatik test odasının ısıtması, Şekil 3.7’de yer alan iç soğutma ünitelerinin içerisinde yer alan rezistanslar vasıtasıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla, klimatik test odasının hem ısıtması hem de soğutması fanlı iç üniteler tarafından yapılmaktadır. Bu ünite, toplamda 25 kW soğutma gücüne sahiptir.



Şekil 3.8. Klimatik test odası dış üniteleri: Termal depolama tankı, nemlendirici, kontrol ünitesi, pompa

Klimatik test odasına ait dış üniteler Şekil 3.8’de verilmiştir. Isı pompasından gelen sıcak su termal depolama tankına üst kısmından giriş yapmaktadır ve tekrar alt kısmından ısı pompasına gönderilerek çevrim tamamlanmaktadır. Isı pompasına giden hat üzerinde bir akış ölçer bulunmaktadır ve akış debisi buradan ayarlanmaktadır. Isı pompası ve depolama tankı arasındaki borular tamamen yalıtılmıştır. Depolama tankından, soğutma için kullanılan ısı pompalarına giden ayrı bir hat üzerinde bir pompa bulunmaktadır. Soğutucu hattan su, istenilenden daha soğuk gelirse, girişte bulunan rezistanslı ısıtıcı devreye girmektedir. Ayrıca termal depolama tankının basıncını sabit tutmak için, termal depolama tankının üzerinde bir genişleme tankı yer almaktadır.

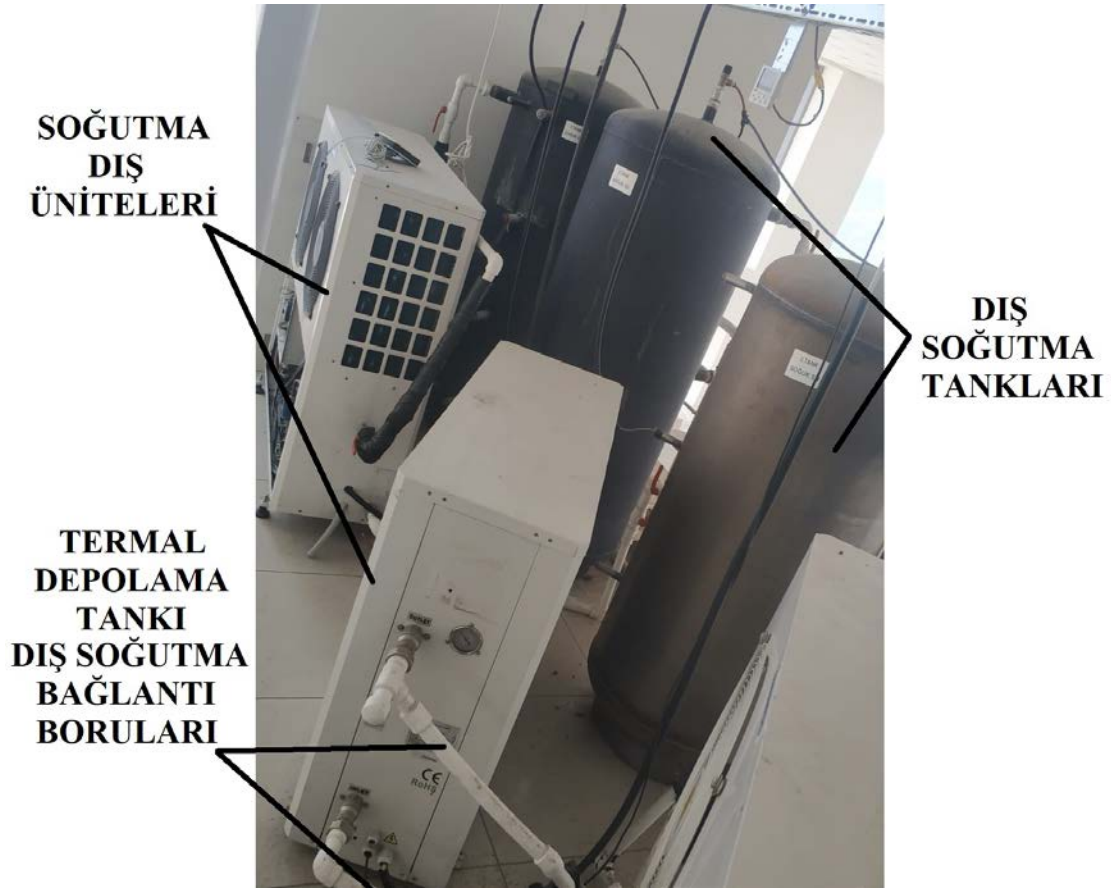
Sistemin ön tarafında bulunan mavi renkteki nemlendirici tarafından, test odasının nem oranı ayarlanmaktadır. Oldukça büyük bir hazneye sahip olan nemlendiricide oluşan nem, üzerinde bulunan bir salyangoz fan ve şeklinin sol tarafında yer alan, yukarıya doğru yönlendirilmiş boru yardımıyla test odasına yönlendirilmektedir. Klimatik test odasının nem yüzdesi, istenilen seviyenin %5 altına düştüğü anda nemlendirici istenilen yüzdeye ulaşmaya kadar çalışmaktadır.



Şekil 3.9. Klimatik test odasını soğutmak için kullanılan dış ünite

Klimatik test odasını soğutmak için kullanılan dış ünite Şekil 3.9’da verilmiştir. Soğutma ihtiyacını karşılamak üzere, 12 kW soğutma kapasitesine sahip dört adet evaporatör dış üniteye yer almaktadır. Şekil 3.7’de verilen iç üniteye kondensörler ve bahsi geçen evaporatörler ile test odasının ortam sıcaklığı şartlandırılmaktadır. Ayrıca, soğutma ünitesinde, evaporatörlerin yanında kontrol elemanlarının yer aldığı bir kapak yer almaktadır. Kısılma vanası, kompresör gibi ana bileşenlere ek olarak, sürücü kartları, sigortalar, devreler gibi kontrol elemanları da bu bölümde yer almaktadır.

Klimatik test odasına ait tüm sensörlerin kontrolü de, bu dış ünite tarafından yapılmaktadır. Şartlandırılan ortamda bulunan sekiz farklı sıcaklık sensöründen gelen veriler burada işlenerek, gerekli ünitenin devreye alınması veya devreden çıkarılması, yine buradan kontrol edilmektedir. Benzer şekilde, test ortamında bulunan iki farklı nem sensörünün verileri de, burada işlenerek Şekil 3.8’de görülen nemlendirici aracılığıyla ortamın nemi istenilen düzeyde tutulmaktadır. Dış soğutma üniteleri ve iç üniteleri birbirine bağlayan borular tamamen yalıtılmış olup, klimatik test odasına girdiği kısımlarda aynı şekilde yalıtılmıştır. Bu sayede, test odasının ısı kaybı en aza indirilmiştir.



Şekil 3.10. Termal depolama tankını soğutmak için kullanılan dış üniteler: Soğutma dış üniteleri, termal depolama tankı dış soğutma bağlantı boruları, dış soğutma tankları

Termal depolama tankını soğutmak için kullanılan soğutma dış üniteleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu üniteler ısı pompalarından ve tanklardan oluşmaktadır. Her biri 16 kW kapasiteye sahip üç farklı ısı pompası, termal depolama tankındaki suyu soğutmak için çalışmaktadır. Her bir ısı pompasına ait 270 litre hacminde, dış soğutma tankı bulunmaktadır. Burada soğutulması yapılan su, bağlantı boruları aracılığı ile termal depolama tankına yönlendirilmektedir.

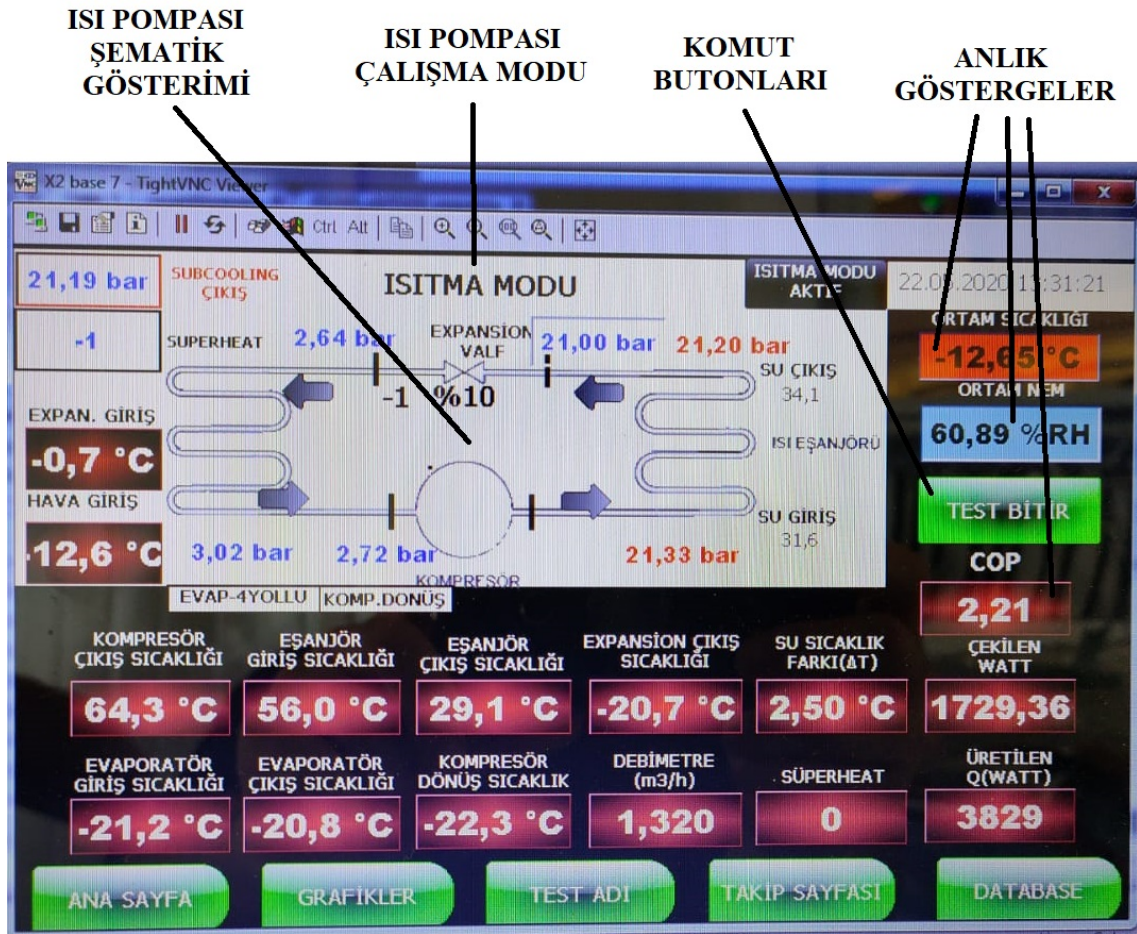
Dış üniteye yer alan ısı pompalarının tamamı her zaman çalışmamaktadır. Bu ısı pompaları, termal depolama tankında istenilen sıcaklığa göre kontrol ünitesi tarafından yönetilmektedir. Örneğin yaz aylarında termal depolama tankındaki suyun sıcaklığı çok düşük sıcaklıklara ayarlanmak istenirse ısı pompalarının hepsi aynı anda devreye girerek, depolama tankındaki suyun sıcaklığını bir an önce istenilen değere soğutmaya çalışmaktadır. Gerektiğinde iki ısı pompası ve tek ısı pompasını da devreye alabilecek şekilde tasarlanan sistem, test odasında testi yapılan sistem ile ısıtılan suyu ivedi bir şekilde istenilen sıcaklığa soğutmaktadır.



Şekil 3.11. Klimatik test odası dış görünüm

Klimatik test odası 6m x 6m boyuta sahip olup, duvar kalınlıkları 16 cm olup sistemin zemini, duvarları ve tavanı poliüretanla yalıtılmıştır. Test odası ısı pompalarının yanında buzdolabı, güneş paneli, klima üniteleri gibi birçok cihazı test etmek üzere tasarlanmıştır. Şekil 3.11’de dış kapısı görülen test odasında, büyük hacimli ürünlerin testleri bu kapı aracılığıyla rahat bir şekilde yapılabilmektedir.

Klimatik test odasında yer alan bütün sensörler 0,1 hassasiyete sahip olup; sıcaklık, nem, aydınlanma, hava bileşenleri gibi iklim değerlerinin yüksek hassasiyetle kontrol edildiği bir alandır. Test odasına giren tesisata verilen su, istenilen sıcaklığa kadar soğutulabilmektedir. Mobil sıcaklık sensörleri aracılığıyla, testi yapılan cihazın istenilen her bölgesinden ölçüm yapılabilmektedir. Ayrıca test odasında nemin fazla olduğu durumlarda kullanılmak üzere nem alma cihazı da bulunmaktadır.



Şekil 3.12. Klimatik test odası yazılımı ekran görüntüsü

Test odasının yazılımına ait ekran görüntüsü Şekil 3.12’de verilmiştir. Isı pompasının şematik gösteriminde düşük ve yüksek hat basınçları, basınç kayıpları ve genişleme vanasındaki kısılma yüzdesi gösterilmektedir. Şematik gösterimin hemen üzerinde, ısı pompasının çalışma modu ve sol tarafında ön soğutmanın çıkışında okunan basınç yer almaktadır. Şeklin sağ tarafına baktığımızda ise, en üstte tarih ve saat göstergesi, hemen altında iklimatik test odasının ortam sıcaklığı ve nem yüzdesi görülmektedir. Hemen altında yer alan “test bitir” butonu ve en altta yer alan yeşil butonlar komut butonlarıdır. Bu verilere ek olarak kırmızı göstergelerde sisteme ait anlık veriler yer almaktadır. Bu veriler başlıca; COP, kompresör çıkış-dönüş sıcaklığı, eşanjör giriş-çıkış sıcaklığı, genişleme vanası çıkış sıcaklığı, su giriş-çıkış sıcaklık farkı, ısı pompasının anlık çektiği-ürettiği güç, evaporatör giriş-çıkış sıcaklığı, debi ve süper ısıtma derecesi olarak sıralanabilir. Tüm bu veriler, ısı pompasının modellenmesine ve modelinin doğrulanmasına zemin hazırlamaktadır. Bu sayede, yapılan birkaç deneyle ve oluşturulan model aracılığı ile istenilen tüm iklim koşullarında bir ısı pompasının analizi yapılabilmektedir.



Şekil 3.13. Klimatik test odası kontrol ünitesi üzerinde yer alan PLC ekran

Test odasına ait tüm sistemler kontrol ünitesi ile yönetilmekte olup, ısı pompasına ait ayrı bir PLC bulunmaktadır. Şekil 3.13'te görülen bu ekran üzerinden, test odası yazılımına ait tüm veriler anlık olarak görülebilmektedir. Bu sayede sistem, herhangi bir bilgisayar ihtiyacı olmadan hem fiziki olarak, hem de uzaktan izlenebilmektedir.

3.4. Simülasyon Modelleri

Güneş destekli ısı pompası sistemi, önceki bölümlerde anlatıldığı gibi tüm sistem test yöntemini kullandığı için güneş kolektörü olmayan bir sistem modeli oluşturularak bu model üzerinde doğrulama yapılmıştır. Güneş kolektörü ile daha gelişmiş bir model oluşturularak, bu model üzerinde de simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, bu bölüm doğrulama modeli ve güneş-ısı pompası modeli olmak üzere iki başlık altında ele alınmıştır.

3.4.1. TRNSYS Ana Bileşenleri

3.4.1.1. Isı Pompası (Tip 941)

TRNSYS yazılımında yer alan Tip 941 bileşeni, yük tarafında sıvı akışı olan tek kademeli bir hava kaynaklı ısı pompasını modeller. Sıvı tarafı ayrıca, ikincil bir sıvı akışını ısıtmak için kullanılabilen isteğe bağlı bir buhar soğutucu ile donatılmıştır (sıcak su devresi gibi). Isı pompası, hava soğutmalı bir kondansatöre enerjiyi vererek (soğutma modu) veya enerjiyi emerek (ısıtma modu) birincil sıvı akışını şartlandırır. İsteğe bağlı buhar soğutucu, ikincil bir sıvı akışını ısıtmak veya soğutmak için kullanılabilir.

Bu model, kapasite (ısıtma modunda toplam kapasite ve soğutma modunda hem toplam hem de makul kapasiteler) ve güç için katalog verilerini içeren kullanıcı tarafından sağlanan veri dosyalarına dayanmaktadır. Isı pompasına giren su sıcaklığı, giren su akış hızı ve hava akış hızının bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Tasarım dışı iç ortam hava sıcaklıklarına dayalı olarak kapasiteleri ve gücü değiştirmek için kullanıcı tarafından oluşturulan diğer performans haritaları kullanılır. Gerekli veriler, üreticiler tarafından tipik olarak tablo şeklinde sağlanan katalog performans veri dosyalarından elde edilebilir.

Bir ısı pompası, enerjiyi düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama aktaran cihazdır. Saf bir soğutma çevriminden farklıdır, çünkü uygulamanın nihai sonucu, soğutucunun sistemden aktığı yöne bağlı olarak ısıtmak ya da soğutmak olabilir. Tip 941'de hava tarafı kaynaktır ve ısı pompası sıvı akışını ya ısıtır ya da soğutur; bu cihazlar bazen ısı pompası su ısıtıcıları olarak bilinir. Tip 941, Tip 917'den cihazın hava tarafındaki nem değişimini hesaplanmaması bakımından farklıdır. Tip 917'de bu etkiler yok sayılır ve sonuç olarak bileşen daha az girdi verisi gerektirir.

Tip 941 bir "ilk prensip" modeli değildir, bunun yerine üreticilerden alınabilecek katalog verilerine dayanır. Bileşenin merkezinde iki veri dosyası bulunur: soğutma performansı verilerini içeren bir dosya ve ısıtma performansı verilerini içeren dosya. Bu çalışmada, ısı pompasının sadece ısıtma modu kullanıldığı için, ısıtma performansı verilerini içeren bir dosya oluşturulmuştur.

Veri dosyasında iki normalleştirilmiş ısıtma performansı ölçümü sağlanmalıdır: normalleştirilmiş toplam ısıtma kapasitesi ve tüketilen normalleştirilmiş güç. Tüketilen güç, kompresörle ilişkili gücün yanı sıra hava tarafı fanıyla ilişkili güç de içermelidir. Kapasiteler ve güç, normalleştirilmiş hava akış hızı, normalleştirilmiş sıvı akış hızı ve giren sıvı sıcaklığının bir fonksiyonu olarak sağlanır.

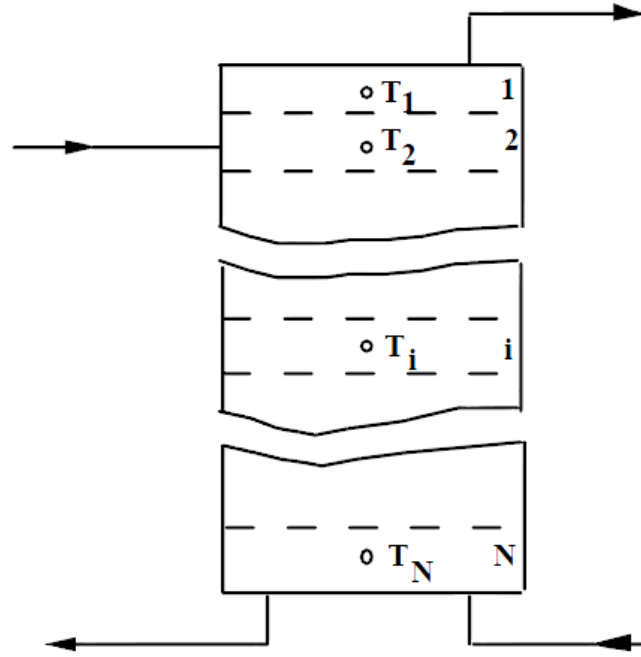
Girilen sıvı sıcaklığının (°C olarak) değerlerinin tümü veri dosyasının ilk satırında görünmeli ve giren hava sıcaklığının (°C olarak) değerlerinin tümü ikinci satırda görünmelidir. Her iki ısıtma performansı ölçütünün değerleri daha sonra her grup kendi satırında görünmelidir. Bir satırda ünlem (!) işaretinden sonra gelen herhangi bir metin yorum olarak yorumlanır ve TRNSYS tarafından dikkate alınmaz. Tip 941, girdilerin mevcut değerlerine (hava akış hızı, sıvı akış hızı ve sıvı giriş sıcaklığı) dayalı olarak ısıtma performans noktaları arasında doğrusal olarak enterpolasyon yapar. Bileşenin, sağlanan veri aralığının ötesine geçmediğine dikkat edilmelidir. Veri aralığı dışında değerler verilirse, maksimum veya minimum soğutma performans değerleri döndürülecek ve simülasyon sonunda TRNSYS listeleme dosyasına ve simülasyon log dosyasına bir uyarı yazılacaktır (TESS, 2014). Kullanılan ısı pompası ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 3.2’de verilmiştir.

3.4.1.2. Depolama tankı (Tip 60c)

Isıl katmanlaşmaya tabi, su dolu bir duyulur enerji depolama tankının ısı performansını, tankın Şekil 3.14’te gösterildiği gibi N ($N \leq 100$) tamamen karıştırılmış eşit hacimli bölümlerden oluştuğu varsayılarak modellenebilir. Tabakalaşma derecesi N değeri ile belirlenir. N 1'e eşitse, depolama tankı tam karışımli bir tank olarak modellenir ve tabakalaşma etkisi mümkün değildir. Sabit veya değişken girişler, eşit olmayan boyutta düğümler, ısıtıcı termostatlarda sıcaklık ölü bandı, artımlı kayıp katsayıları, dahili dalgıç ısı eşanjörleri, dairesel olmayan tanklar, yatay tanklar ve yardımcı bir gaz ısıtıcısının baca kayıpları seçenekleri model içerisinde mevcuttur.

Düğüm sayısını değiştirmeyi kolaylaştırmak için, tank bileşeni konumları, düğüm numaraları yerine tabandan yukarıya doğru ölçülen yükseklikler olarak girilir. Bu bileşenler; giriş ve çıkış debileri, yardımcı ısıtıcılar, termostatlar ve ısı eşanjörlerini içerir. İki giriş modu mevcuttur. Mod 1'de akış, sıcaklık olarak kendisine en yakın olan düğüme doğru akar. Yeterli düğüm sayısı ile en yüksek derecede tabakalaşmaya izin verir. Mod 2'de akış, kullanıcı tarafından belirtildiği gibi, tanka sabit bir konumda girer. Her zaman aralığının sonunda, mevcut olan herhangi bir sıcaklık uyumsuzluğu uygun bitişik düğümlerin karıştırılmasıyla ortadan kaldırılır. Kullanıcı, son ayarlanan parametreleri kullanarak her bir düğümün yüksekliğini belirleyebilir. İsteğe bağlı olarak, 31 numaralı parametreyi sıfıra ayarlayarak eşit büyüklükteki düğümler oldukça basit bir şekilde belirtilebilir. Model, tankı otomatik olarak eşit parçalara bölecektir. Bu durumda, ek

düğüm boyutu belirtimi gerekmez. Model tarafından kullanılan tankın hacminin, tankın gerçek hacmi olduğu varsayılır.



Şekil 3.14. Tabakalı sıvı depolama tankı

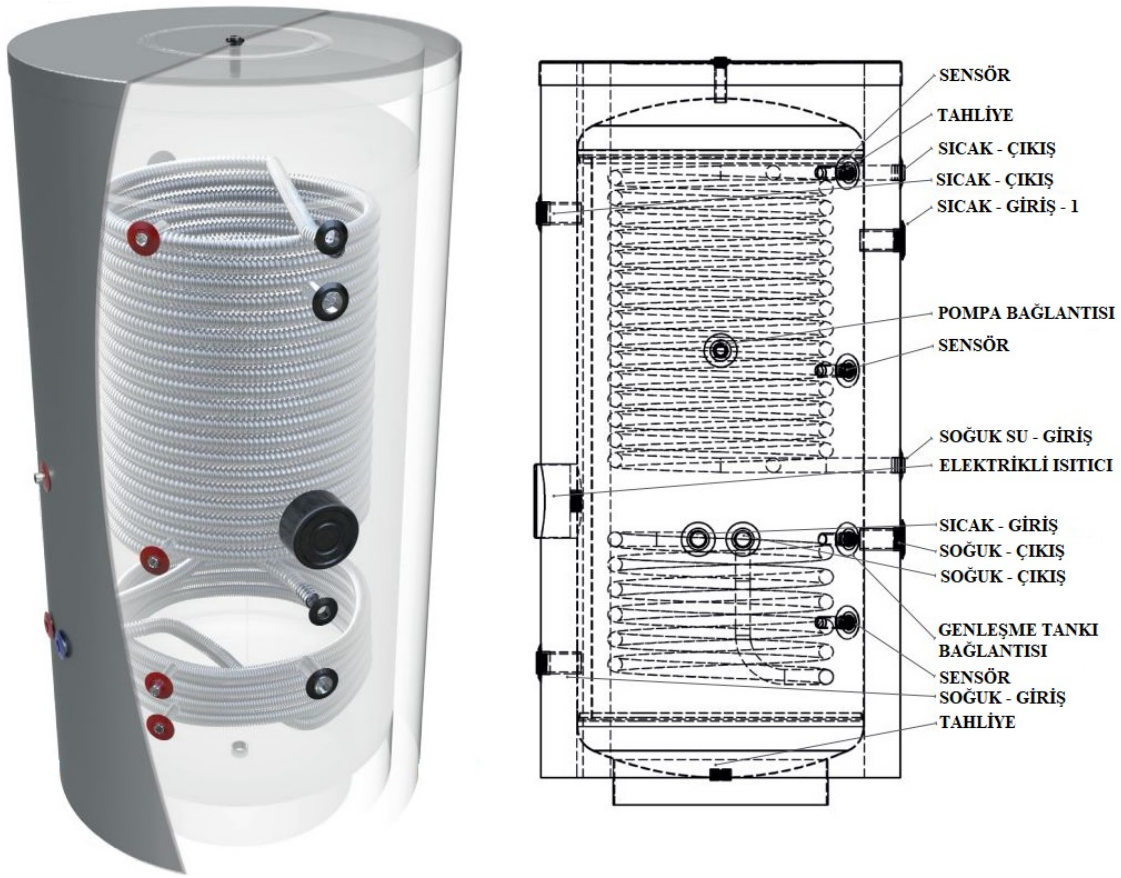
Model isteğe bağlı olarak sıcaklık ve/veya zaman kontrolüne bağlı iki adet elektrik rezistanslı ısıtma elemanı içerir. Kontrol seçeneği, her günün belirli zamanlarında (örneğin, yoğun olmayan saatler) depoyu elektrik enerjisi ile ısıtmasına izin verir. Elektrik rezistanslı ısıtıcılar iki moddan birinde çalışabilir.

Mod 1, bir ana birim ve yardımcı birim ilişkisi modudur. Alt ısıtma elemanının, yalnızca üst eleman istenilen değerde olduğunda etkinleştirilmesine izin verir. Bu kontrol modunda her iki elektrikli ısıtıcının aynı anda açık olması mümkün değildir. Ancak aynı TRNSYS zaman adımında her iki ısıtıcının da açık olması mümkündür (zaman adımının ilk yarısında üst ısıtıcı açık olabilir ve zaman adımının ikinci yarısında alt ısıtıcı açık olabilir). Mod 1, çoğu evsel sıcak su uygulamasında tercih edilir.

Mod 2'de her iki ısıtıcı aynı anda açık olabilir. Bu, depolama tankının daha hızlı ısıtılmasını sağlar, ancak önemli ölçüde daha yüksek bir elektrik tüketimine yol açar. Modellenecek tankta elektrikli ısıtma elemanı yoksa, kullanıcı kontrol anahtarını (girişler 8 ve 9) sıfır değerinde sabit bir değere ayarlayabilir veya ısıtıcı gücünü sıfır olarak belirleyebilir. Yardımcı ısıtıcılar bir sıcaklık ölü bandı kullanır.

Model, gaz yardımcı ısıtıcılı tanklara da izin verir. Model, gaz yardımcı enerjisini elektrik enerjisiyle aynı şekilde ele alır, bu nedenle brülör ateşlendiğinde ısı hızı, elektrik gücüyle aynıdır. Brülör açıkken bacaya enerji kaybı olmaz. Brülör kapalıyken, parametre

olarak girilen baca sıcaklığında, bacaya enerji kaybedilir. Kullanıcı, bacaya ısı kaybı ve baca sıcaklığı için genel iletkenliği belirler.



Şekil 3.15. Modellemesi yapılan termal depolama tankı

Tip-60c boyler, iki bağımsız ısıtıcı ve iki farklı ısı kaynağına eklenebilen bir model olup, Şekil 3.15'te verilmiştir. Termal depolama tankına ait Tablo 3.1'de verilen teknik özellikler, Tip-60c modeline veri olarak girilmiştir.

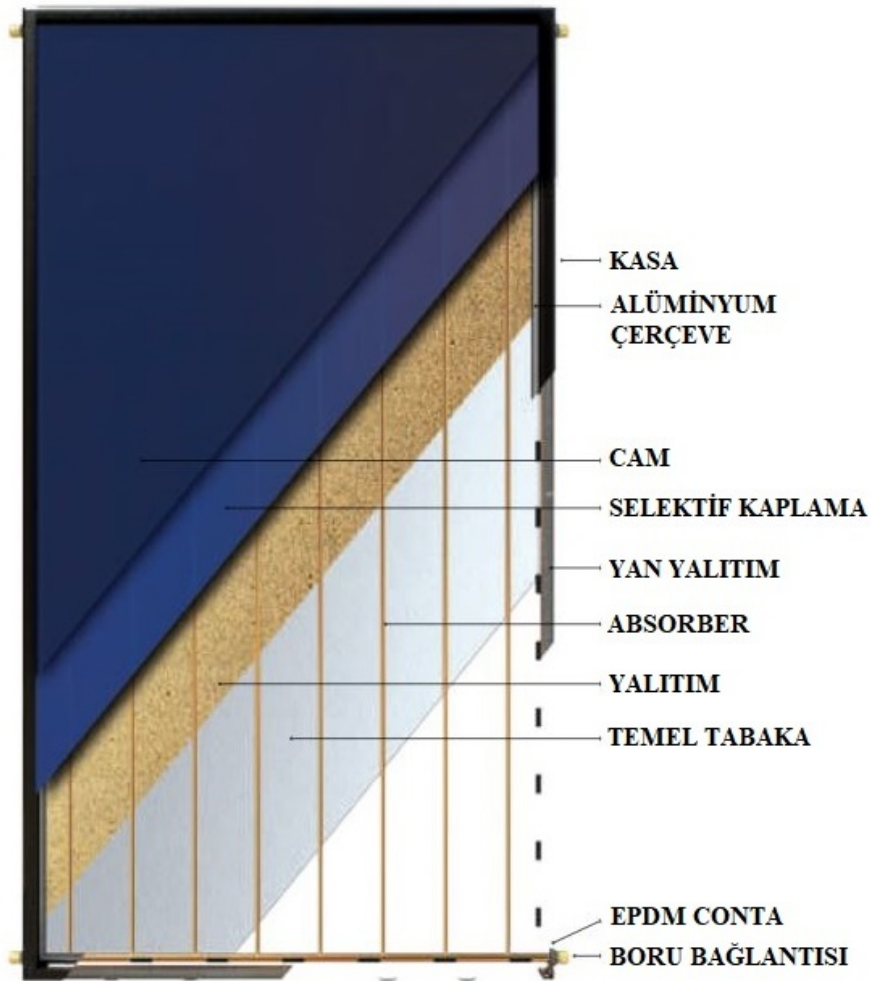
Tablo 3.1. Solikombi 300 termal depolama tankına ait teknik özellikler

Solikombi 300			
Üretim Kodu	MA-0367	Yalıtım Malzemesi	Poliüretan (CFC Free)
Yükseklik	1770 mm	Dış Silindir Malzemesi	ST 37 Çelik
Çap	542 mm	Serpantin Malzemesi	AISI 316 L P. Çelik
Net Ağırlık	85 kg	Serpantin Adedi	2
Hacim	245 lt	1. Serpantin	3,83 m ²
Yalıtım	50 mm / 40 kg/m ³	2. Serpantin	1,75 m ²

3.4.1.3. Düz-plaka güneş kolektörü (Tip 1b)

Bu bileşen, teoriyi kullanarak çeşitli kolektör türlerinin termal performansını modeller. Toplam toplayıcı dizisi, seri ve paralel olarak bağlanmış kolektörlerden oluşabilir. Toplam kolektör dizisinin termal performansı, serideki modül sayısı ve her modülün özellikleri ile belirlenir. Kullanıcı, akışkan sıcaklığı ve ortam sıcaklığı farkının, radyasyon oranına karşı standart verimlilik testlerinden elde edilen sonuçları sağlamalıdır. Akışkan sıcaklığı bir giriş, ortalama veya çıkış sıcaklığı olabilir.

Normal olmayan güneş olaylarının etkilerini değerlendirmek için dört olasılık vardır. Optik mod 2 ve 3, tek eksenli geliş açısı değiştiricileri için test verileri gerektirir. Optik mod 4, kapakların özelliklerinden değiştiricileri belirler. Beşinci optik modda, kullanıcı iki eksenli geliş açısı değiştirici verilerini girmelidir. Bu, boşaltılmış tüpler vb. gibi optik olarak simetrik olmayan kolektörleri dikkate almak için kullanışlıdır. Optik, mod 1'e ayarlanırsa, hiçbir normal dışı olay etkisi dikkate alınmaz.



Şekil 3.16. Wunder ANSG 1808 düz plaka termal kolektör

Sistem modelinde termal kolektör olarak, Tip-1b düz plaka güneş kolektörü kullanılmaktadır. Kolektör alanı 1,62 m² ve akışkan özgül ısısı 4,190 kJ/kg.K olarak modele tanımlanan Wunder ANSG 1808 kolektör Şekil 3.16'da verilmiştir (Solimpeks Corp., n.d.). Diğer kolektör özellikleri, Tablo 3.2'de yer alan verilere göre modele tanımlanmıştır.

Tablo 3.2. Wunder ANSG 1808 düz plaka termal kolektöre ait teknik özellikler

Wunder ANSG 1808			
Üretim Kodu	MA-0045	Boru Sayısı	8
Ölçüler (mm)	1927x927x90	Cam	Normal Temperli Cam
Kasa	Alüminyum	Cam Kalınlığı (mm)	4
Brüt Alan	1,79 m ²	Yalıtım	Cam Yünü
Açıklık Alanı	1,62 m ²	Yal. Yoğunluk (kg/m³)	14
Absorber Alanı	1,59 m ²	Yal. Kalınlık (mm)	50
Absorber Malz.	Almecco-Tinox Yüksek Selektif Al.	Durma Sıcaklığı (°C)	190
Soğurma/Yayma	0,95 / 0,03	Max. Basınç (bar)	10
Kaynak	Lazer kaynağı	Nominal Akış (lt/h)	100
Boru iç hacim	1 lt.	Arka Kapak	Alüminyum
Absorber/Bağlantı	8mm / 18mm	Montaj Tipi	Çatı içi – Çatı üstü – Düz çatı
Çapları			

3.4.1.4. Fotovoltaik Kolektör (Tip 94a)

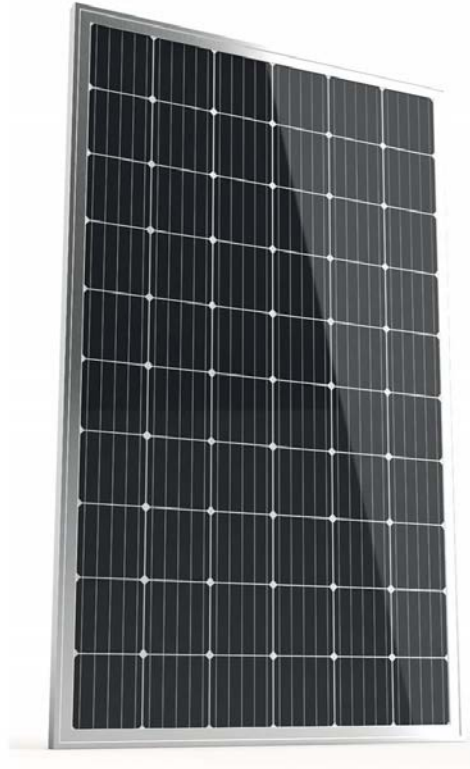
Bu bileşen, bir fotovoltaik kolektörün elektrik performansını modeller. Tip 94, elektrik depolama aküleri, doğrudan yük bağlantısı ve şebeke bağlantılarını içeren simülasyonlarda kullanılabilir. Tek bir modülün akım voltaj özelliklerini tahmin etmek için ampirik bir eşdeğer devre modeli için denklemler kullanır. Bu devre bir DC akım kaynağı, diyot ve bir veya iki dirençten oluşur. Akım kaynağının gücü güneş radyasyonuna bağlıdır ve diyotun I-V (akım-gerilim) özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Tek modül eşdeğer devre için sonuçlar tahmin edilerek, aslında çok modüllü bir fotovoltaik kolektörün performansı da tahmin edilmiş olunur.

Kristal modüller için (tek kristal veya polikristal teknolojisi), Tip 94 "dört parametrelili" eşdeğer devre kullanır. Bu parametrelerin değerleri doğrudan üretici kataloglarından elde edilemez. Ancak Tip 94, bunları mevcut verilerden otomatik olarak hesaplayacaktır. Amorf/ince film fotovoltaik modülleri için beş matematiksel parametreyi içeren ikinci bir eşdeğer devre modeli mevcuttur. Yine bileşen, üreticilerin katalog verilerinden bu değerleri belirleyecektir.

Tip 94 ayrıca fotovoltaik modül yüzeyinin yansımalarının güneş ışınımının geliş açısıyla nasıl değiştiğini hesaplamak için isteğe bağlı bir geliş açısı değiştirici korelasyonu içerir. Tip 94, yük voltajının bir fonksiyonu olarak fotovoltaik akımını belirler. Diğer çıkışlar, I-V eğrisi boyunca maksimum güç noktasındaki akım ve voltajı, açık devre voltajını ve kısa devre akımını içerir.

Tip 94 fotovoltaik kolektör için bir dizi simülasyon seçeneği mevcuttur. Bunlardan ilki kolektörün elektriksel performansını tahmin etmek için kullanılan matematiksel modeldir. Tek kristal veya polikristal fotovoltaik kolektörler için “dört parametrelili” model kullanılmalıdır. Bu, kısa devre koşullarında I-V eğrisinin eğiminin sıfır olduğunu varsayar. Dört parametrelili model, PARAMETRE 18 için sıfır veya pozitif bir değer girildiğinde etkinleştirilir. İkinci fotovoltaik kolektör modeli, “beş parametrelili model”, amorf veya ince film kolektörler için tasarlanmıştır. Bu, kısa devre durumunda I-V karakteristiğinde sonlu bir negatif eğim üretir. PARAMETRE 18 için negatif bir değer girildiğinde, Tip 94 bu değeri kısa devre I-V eğimi olarak alır ve beş parametrelili modeli etkinleştirir.

İkinci seçenek, simülasyonun “geliş açısı değiştirici” korelasyonunu çağırması gerekir gerekmediğidir. Bu korelasyon, modül üzerine geniş açılarda radyasyon geldiğinde artan yansıma kayıplarını açıklar. PARAMETRE 16 pozitif bir değer ise TRNSYS geliş açısı değiştiricisini çağırmaz. Bu durumda, PARAMETRE 16, tüm geliş açıları için geçirgenlik-soğurma çarpımı ($\tau\alpha$) değeridir. PARAMETRE 16 için negatif bir değer girildiğinde açı değiştirici korelasyonu etkinleştirilir. Açı değiştirici korelasyonu, PARAMETRE 16 için negatif bir değer girildiğinde etkinleştirilir. O zaman PARAMETRE 16'nın büyüklüğü, normal geliş için $\tau\alpha$ çarpımıdır; Diğer açılar için $\tau\alpha$, ise; normal değere ve ampirik bir korelasyona dayalı olarak hesaplanır.



Şekil 3.17. Winasol M3 330W monokristal fotovoltaik kolektör

Sistem modelinde fotovoltaik kolektör olarak, Tip 94a fotovoltaik kolektör kullanılmıştır. 330W güç değerine sahip Winasol M3 monokristal kolektör Şekil 3.17’de, kolektöre ait veriler ise Tablo 3.3’te verilmiştir (2H Energy, n.d.).

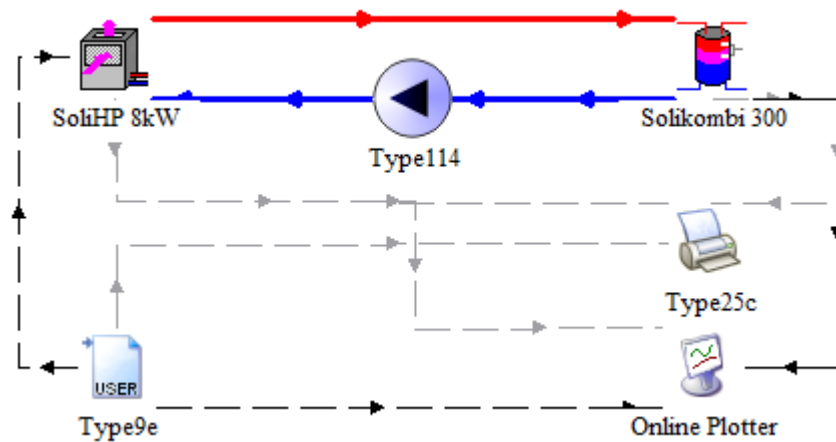
Tablo 3.3. Winasol M3 330W Monokristal Fotovoltaik Kolektöre ait özellikler

Winasol M3 330W	
Fotovoltaik Hücre Fiziksel Özellikleri	
Ölçüler (mm)	158,75 x 158,75 ($\pm 0,5$)
Köşegen (mm)	224 ($\pm 0,5$)
Kalınlık (mm)	190 ± 30
Ön Yüz	Mavi silikon nitrür yansıma önleyici kaplama
	0,7 mm genişlik gümüş süreksiz elektrot
Arka Yüz	Alüminyum tüm arka yüzey
	1,8 mm genişlik gümüş süreksiz elektrot
Maksimum Güç	
Modül verimi (%)	19,73
Maks. Güç Noktası Akımı (Amper)	9,78
Kısa Devre Akımı (Amper)	10,21
Maks. Güç Noktası Voltajı (Volt)	33,8
Açık Devre Voltajı (Volt)	41,21
Mekanik Veriler	
Ölçü (mm)	1669 x 1002 x 35
Ağırlık (kg)	19
Ön Cam	Temperli Antireflekte Cam
Çerçeve	Eloksal Kaplamalı Alüminyum Çerçeve

Bağlantı Kutusu	IP68 1200mm solar kablo & konnektör
Sıcaklık Özellikleri	
Çalışma Sıcaklığı	-40°C & 85°C
Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı	45°C ± 2°C
Akım Sıcaklık Katsayısı	+ 0,07 %/K
Voltaj Sıcaklık Katsayısı	- 0,36 %/K
Güç Sıcaklık Katsayısı	- 0,38 %/K

3.4.2. Doğrulama modeli

Şekil 3.18’de verilen sistem modeli TRNSYS’de oluşturulmuştur (The Solar Energy Laboratory, 2006). Isı pompası ve boylere ait tüm parametreler ve veriler modele işlenmiştir. Boylerdeki sıcaklık aşağıdan yukarıya doğru artar. Doğrulama modelinde, pompa yardımıyla tankın alt kısmından su çekilir ve ısı pompasına bir pompa aracılığıyla yönlendirilir (mavi hat). Isı pompası, ortamdaki aldığı havanın ısını ve kompresörün akışkana aktardığı enerjiyi kullanarak akışkanın enerjisini artırır. Son olarak ise, ısı pompasında ısınan yüksek sıcaklıktaki su boylere aktarılır (kırmızı hat).



Şekil 3.18. Hava kaynaklı ısı pompası ve boylardan oluşan evsel sıcak su sisteminin TRNSYS doğrulama modeli

Oluşturulan modelde kullanılan bileşenler Tablo 3.4’te verilmiştir. Tip-941 ısı pompası, nem etkisinin ihmal edildiği bir hava kaynaklı ısı pompasıdır. Ortam nemi sabit tutulduğu için modelde de aynı değer tanımlanmıştır. Tip-60c boyler, iki bağımsız ısıtıcı ve iki farklı ısı kaynağına eklenebilen bir modeldir. Bu sayede istenilen kolektör tipi sisteme kolaylıkla eklenir. Sistem, Tip-114 pompa aracılığıyla aktif hale getirilir. Tip-9e, deneysel koşulların modele aktarılabilceği bir veri giriş aracıdır. Simülasyon koşulları tanımlanırken modelde deney sisteminde olduğu gibi 15 saniyelik bir veri aralığı

seçilmiştir. Sistem çıktıları ve çıktı verilerini anında görmek için yazıcı ve online çizici kullanılmıştır.

Tablo 3.4. TRNSYS’te oluşturulan doğrulama modelinin bileşenleri

No.	Bileşen Adı	Tip	No.	Bileşen Adı	Tip
1	Isı Pompası	941	4	Veri Okuyucu	9e
2	Boylar	60c	5	Online Çizici	65d
3	Pompa	114	6	Yazıcı	25c

Simülasyon için seçilen lokasyon Konya ili olup, 1929-2020 yılları arasındaki en yüksek aylık ortalama sıcaklık 30,2 °C, en düşük aylık ortalama sıcaklığın ise -4,2 °C olduğu Şekil 3.19’da görülmektedir. Bu nedenle, deneysel doğrulama testlerinde ortam sıcaklığı

KONYA	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1929 - 2020)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	-0.2	1.4	5.5	11.1	15.9	20.1	23.5	23.3	18.8	12.8	6.5	1.7	11.7
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	4.6	7.0	11.7	17.5	22.4	26.7	30.2	30.2	26.0	20.1	13.0	6.6	18.0
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-4.2	-3.3	-0.2	4.3	8.6	12.6	15.9	15.6	11.0	5.9	0.8	-2.3	5.4
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3.3	4.6	5.9	7.2	9.0	10.7	11.8	11.4	9.7	7.3	5.3	3.2	7.4
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11.1	10.0	10.9	11.7	13.0	8.4	3.2	2.6	4.4	7.9	8.2	11.4	102.8
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	37.8	28.5	29.1	32.1	43.4	25.7	7.0	6.3	13.4	29.8	32.5	43.6	329.2
Ölçüm Periyodu (1929 - 2020)													
En Yüksek Sıcaklık (°C)	17.6	23.8	28.9	30.9	34.4	36.7	40.6	39.0	38.8	31.6	25.4	21.8	40.6
En Düşük Sıcaklık (°C)	-28.2	-26.5	-16.4	-8.6	-1.2	1.8	6.0	5.3	-3.0	-8.4	-20.0	-26.0	-28.2
<i>En yüksek ve en düşük sıcaklıkların gerçekleşme tarihini görmek için fare imlecini değerlerin üstüne getiriniz.</i>													
Günlük Toplam En Yüksek Yağış Miktarı				Günlük En Hızlı Rüzgar				En Yüksek Kar					
22.02.1945 73.7 mm				18.04.2012 32.4 m/sn				22.02.1945 66.0 cm					

Şekil 3.19. Konya ili için 1929-2020 yılları arasındaki aylık ortalama iklim verileri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü)

30 °C'den -7 °C'ye kadar düşürülmüştür. Bu arada, boylerdeki su 15 °C'den 50 °C'ye kadar ısıtılmıştır. 50 °C genel olarak evsel sıcak su sistemleri için kullanılan boylerde istenen sıcaklıktır ve bu sıcaklık değeri simülasyonda boyler için de seçilmiştir. Pompanın debisi 1643 kg/saat olarak ayarlanmıştır.

Konuyla ilgili daha kısıtlı koşullarda, sistemin çalışmasını test ve kontrol etmek amacıyla bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada, ortam sıcaklığı 15 °C'den 0 °C'ye düşürülmüş ve su deposundaki su 30 °C'den 50 °C'ye ısıtılmıştır.

3.4.3. Güneş – Isı Pompası Modeli

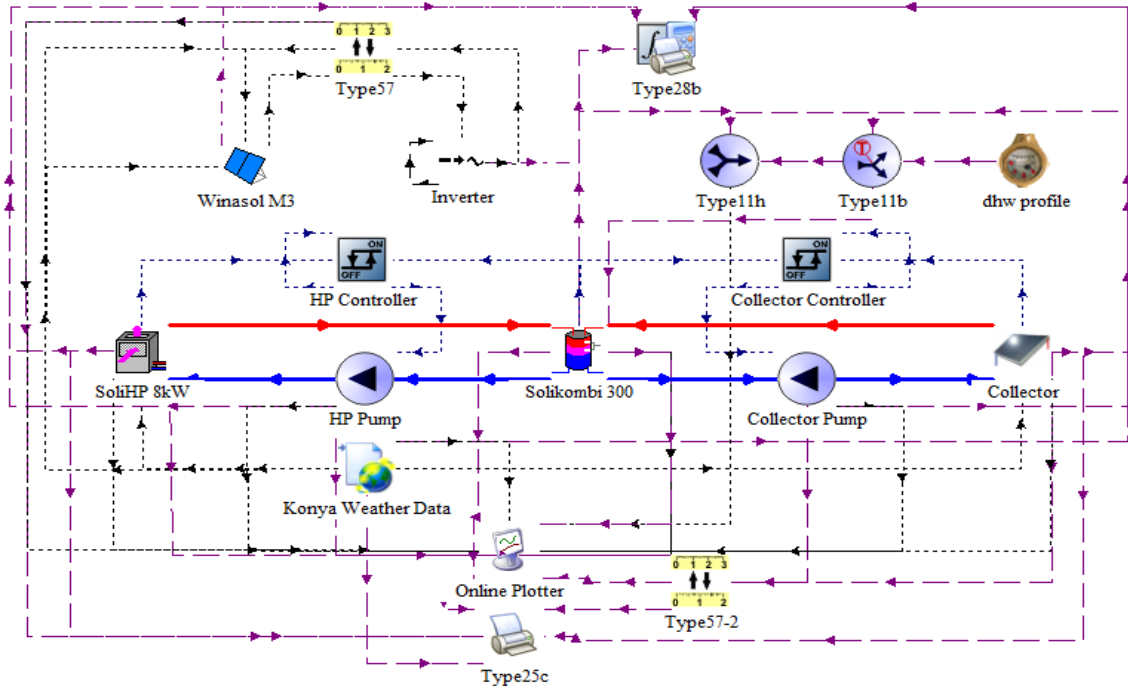
Sistem modeli dört farklı senaryoyu gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Tüm senaryolar bir evin evsel sıcak su ihtiyacını karşılayabilecek şekilde planlanmıştır. İlk senaryoda sistem, boylerdeki suyun herhangi bir yenilenebilir enerji desteği olmaksızın sadece ısı pompası ile ısıtılması esasına dayanmaktadır. İkinci senaryoda ise sistem, ısı pompasına ek olarak bir güneş kolektörü kullanılarak test edilir. Üçüncü ve dördüncü senaryolarda kolektör sayısı sırasıyla iki ve üç olarak seçilmiştir. Maksimum üç kolektör için uygun alanı bulunan ev çatıları temel alınarak senaryolar oluşturulmuş ve her senaryoda en verimli sistem aranmıştır. Bu senaryoların oluşturulmasının temel nedeni, ısı pompası sisteminin hem termal hem de elektrik enerjisini aynı anda kullanabilecek olmasıdır. Buna göre sistemde hem termal hem de fotovoltaik kolektörler kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan senaryolar ve bu senaryolarda kullanılan ana bileşenler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Simülasyonu gerçekleştirilen senaryolar

Senaryo	Ana Bileşenler	Kısaltma
1	Isı Pompası + Boyler	IP
2	Isı Pompası + Boyler + 1 Kolektör*	IP + 1TE IP + 1 FV
3	Isı Pompası + Boyler + 2 Kolektör*	IP + 2 TE IP + 1 TE + 1 FV IP + 2 FV
4	Isı Pompası + Boyler + 3 Kolektör*	IP + 3 TE IP + 2 TE + 1 FV IP + 1 TE + 2 FV
	(*: Termal veya Fotovoltaik)	IP + 3 FV

Termal ve fotovoltaik kolektör sistemleri, kontrolörleri, sıcak su tüketim profili ve meteorolojik veriler doğrulama modeline eklenerek geliştirilen simülasyon modeli Şekil

.20'de verilmiştir. Isı pompası ve boyler sistemi ise deneysel doğrulama modeli ile aynıdır.



Şekil 3.20. Hava kaynaklı ısı pompası, boyler termal ve fotovoltaik kolektörlerden oluşan evsel sıcak su sisteminin TRNSYS modeli

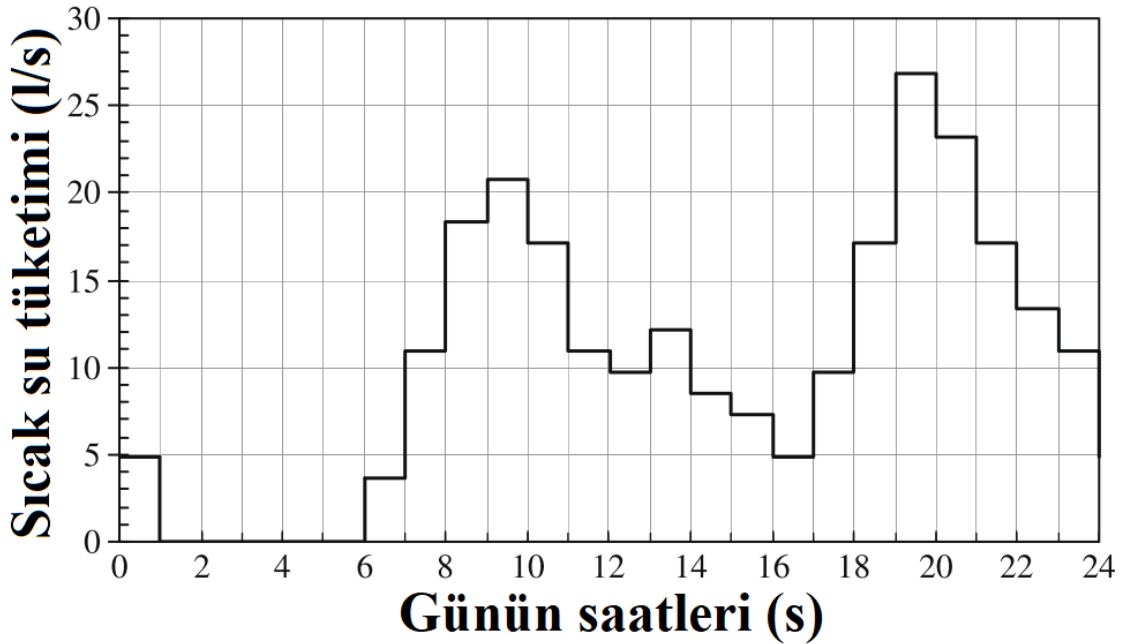
Simülasyon için zaman adımı, doğrulama modelinden farklı olacak şekilde bir saat olarak seçilmiştir. Bunun temel nedeni simülasyonların dinamik ve yıllık olarak yapılmasıdır. Çözüm yöntemi doğrulama modelinde olduğu gibi 'Successive' olarak seçilmiştir. Simüle edilen modelin bileşenleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Tip 941, 60c, 114, 65d ve 25c önceki bölümde tanımlanmıştır. Kullanılan diğer bileşenlerin ait tanımlamalara aşağıda yer verilmiştir.

Tablo 3.6. TRNSYS'te oluşturulan güneş – ısı pompası modelinin bileşenleri

No.	Bileşen Adı	Tip	No.	Bileşen Adı	Tip
1	Isı Pompası	941	9	Online Çizici	65d
2	Boyler	60c	10	Yazıcı	25c
3	Düz-plaka Güneş Kolektörü	1b	11	Birim Çevirici	57
4	Pompa	114	12	T Bağlantı	11h
5	Kontrolör	2b	13	Yönlendirici	11b
6	Fotovoltaik Kolektör	94a	14	Su Sayacı	14b
7	Evirici	48a	15	Simülasyon Özeti	28b
8	Hava Verisi	15-1			

Tip 15-1, sistemin meteorolojik verilerini tanımlamak için kullanılır. Konya iline ait meteorolojik veriler için, Tip 15-1'deki Meteororm dosyası kullanılmıştır. Ayrıca bir

evin günlük sıcak su tüketim profilini modele tanımlamak için Tip 14b su sayacı kullanılmıştır. Bu tüketimi etkileyen gün, mevsim, aile birey sayısı gibi birçok faktör vardır. Ayrıca literatürde Rand, sabit, erken öğleden sonra ve geç öğleden sonra gibi birçok yük profili bulunmaktadır (Hobbi and Siddiqui, 2009). Bu çalışma için toplam günlük 246 l/gün tüketime sahip Rand profili (Murch, 1974) tercih edilmiştir. Profilin bir gün için, saatlik bazda tüketimi Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Günlük sıcak su tüketim profili (246 litre/gün)

Sistemde fotovoltaik kolektör olarak Tip-94a kullanılmakta olup, ısı pompasının elektrik tüketimine katkı sağlanması hedeflenmektedir. Monokristal tip modülde 60 hücre bulunmakla birlikte tek bir panelin yüzey alanı 1.7 m² ve panel gücü 340W’tır. Kullanılan kolektör Solar Module M3 olup tüm katalog verileri simülasyonda Tip-94a bileşenine veri olarak girilmiştir (2H Energy, n.d.).

Oluşturulan modelde ısı pompası ve termal kolektör çevriminde iki adet Tip 114 pompa kullanılmaktadır. Her iki çevrimde de boylerden çıkan su, ısıtılacağı ilgili bileşenlere yönlendirilir. Katalog verilerine göre ısı pompası devresindeki pompa için akış 1641 kg/saat, termal kolektör devresindeki pompa için kolektör başına 100 kg/saat olarak belirlenmiştir. Pompa güçleri sırasıyla 50W ve 15W olup, sistem çalışırken pompalar %100 güçte çalışmaktadır. Pompalar Tip 2b kontrolörler tarafından kontrol edilir ve kontrolörlerin çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır.

Evsel sıcak su sistemindeki ısı pompasını ve termal kolektör döngüsünü kontrol etmek için iki adet Tip 2b kontrolör kullanılmıştır. Isı pompası sistemindeki kontrolör,

boylerdeki su sıcaklığı istenilen sıcaklık olan 50 °C'nin altına düşer düşmez hattaki pompayı ve ısı pompasını çalıştırır. Boyler istenilen sıcaklığa ulaştığında ise ısı pompası devre dışı bırakılır. Termal kolektör devresindeki kontrolör ise kolektör giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki fark 3 °C'nin üzerine çıktığında bu çevrimdeki pompayı çalıştırır ve fark 2 °C'nin altına düştüğünde pompayı kapatır. Ayrıca, kolektöre giren suyun sıcaklığı 90 °C'yi aştığında, sistemde kaynamayı önlemek için pompa otomatik olarak kapatılır. Tank içerisindeki suyun soğumasını önlemenin yanı sıra, ısı pompası ve kolektörden yüksek verimle faydalanılarak, tanktaki suyun istenilen sıcaklığın altına düşmemesi kontrolörler sayesinde sağlanır.

3.5. Performans Parametrelerinin Doğrulaması

Model doğrulamasının, ısı pompasının performans katsayısı (COP), ısı pompası su giriş, çıkış sıcaklığı ve ortalama boyler sıcaklığına göre yapılacağı daha önceki bölümlerde belirtildi. Isı pompasının performans katsayısı doğrulanarak, ısıl girdi, akışkana aktarılan ısı, tüketilen güç gibi sisteme ait birçok veri doğrulanmakta ve aynı zamanda ilgili katsayıların doğru bir şekilde hesaplanabilmesini de sağlanmaktadır. Isı pompası giriş, çıkış sıcaklığı ve ortalama tank sıcaklığının doğrulanması, boylerdeki sıcaklık dağılımının sistemde doğru bir şekilde tanımlandığının göstergesidir. Bu performans katsayılarını hesaplamak için modelin kullandığı denklemler aşağıda verilmiştir.

Yoğuşturucu ve buharlaştırıcıdaki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir (TESS, 2014).

$$Q_{yoğuşturucu} = Q_{buharlaştırıcı} + W_{kompresör} \quad (3.1)$$

Havadaki nemin sabit olduğu varsayıldığından, buharlaştırıcının üzerinden geçen havanın entalpisi aşağıdaki gibidir (TESS, 2014).

$$h_{hava,çıkan} = h_{hava,giren} - \frac{Q_{buharlaştırıcı}}{\dot{m}_{hava}} \quad (3.2)$$

Buharlaştırıcıdaki fanın enerjisi çıkan havanın entalpisine eklenirse, havanın entalpisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$h_{hava,çıkan} = h_{hava,çıkan} + \frac{W_{fan}}{\dot{m}_{hava}} \quad (3.3)$$

Toplam enerji transferi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$Q_{toplam,hava} = \dot{m}_{hava}(h_{hava,çıkan} - h_{hava,giren}) \quad (3.4)$$

$$Q_{duyulur,hava} = \dot{m}_{hava}C_{p_{hava}}(T_{hava,çıkan} - T_{hava,giren}) \quad (3.5)$$

$$Q_{gizli,hava} = Q_{toplam,hava} - Q_{duyulur,hava} \quad (3.6)$$

$$Q_{sıvı,akışkan} = Q_{yoğusturucu} \quad (3.7)$$

Isı pompasının ısıtma modu için performans katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir (Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, 2019).

$$COP = \frac{Q_{yoğusturucu}}{W_{kompresör} + W_{fan} + W_{pompa}} \quad (3.8)$$

Performans katsayısı kısaca sistemden elde edilmek istenen ısının, sistem tarafından tüketilen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Soğutma sistemleri için ise, sistemin ortamdan çekmeyi hedeflediği ısının, sistem tarafından tüketilen enerjiye oranı olarak tanımlanır. COP'nin yanında, yoğusturucuya giren ve çıkan su sıcaklıkları da model doğrulaması için kullanılmıştır. Giren ve çıkan su sıcaklıkları kullanılarak yoğusturucudan çekilen ısı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{yoğusturucu} = \dot{m}_{su}C_{p_{su}}(T_{su,çıkan} - T_{su,giren}) \quad (3.9)$$

3.6. Ekonomik Analiz

Yatırım projeleri arasından seçim yapmak için en önemli kriterlerden ikisi net bugünkü değer (NBD) ve iç verim oranıdır (İVO). Birçok durumda yatırım projeleri her iki kriterde göre de aynı anda sıralanır (Osborne, 2010). NBD, nakit girişlerinin bugünkü değeri ile bir dönem boyunca nakit çıkışlarının bugünkü değeri arasındaki farktır. Buna karşılık, İVO, potansiyel yatırımların kârlılığını tahmin etmek için kullanılan bir hesaplamaadır.

Bu ölçümlerin her ikisi de esas olarak, yatırımcıların yeni bir yatırım veya genişleme fırsatının değerli olup olmadığını belirleme süreci olan sermaye bütçelemesinde kullanılır. Bir yatırım fırsatı verildiğinde, bir yatırımcının yatırımı

üstlenmesinin kendisi için ekonomik kâr mı yoksa zarar mı oluşturacağına karar vermesi gerekir (Lefley, 1996).

NBD ve İVO, yatırımları veya sermaye projelerini değerlendirmek için kullanılan iskonto nakit akışı yöntemleridir. NBD, belirli bir süre boyunca iskonto edilmiş nakit girişlerinin bugünkü değeri ile çıkışların çıkarılması arasındaki nakit tutarı farkıdır. Bir yatırımın, NBD'si sıfırın üzerinde ise, finansal olarak değerli olduğu kabul edilir. İVO, bir nakit miktarı yerine bir yüzde değeri kullanarak potansiyel yatırımların kârlılığını tahmin eder.

NBD'nin belirlenmesi için yatırımcı, yatırımın gelecekteki nakit akışlarını tahmin eder ve projenin sermaye maliyetini ve riskini temsil eden bir iskonto oranı kullanarak bunları bugünkü değer tutarlarına indirir. Ardından, yatırımın gelecekteki tüm pozitif nakit akışları, tek bir bugünkü değer sayısına indirgenir. Bu rakamın yatırım için gereken ilk nakit harcamasından çıkarılması, yatırımın net bugünkü değerini verir. İVO ise NBD değerinin sıfıra eşit olduğu durumdaki iskonto oranı olarak tarif edilir. Sonuç, olarak İVO değeri, iskonto oranından ne kadar büyük ise, yatırımın kazancı o derece yüksek olacaktır (Biezma and San Cristóbal, 2006).

$$NBD = - \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (10)$$

Burada, B, i yılındaki nakit çıkışını gösterirken; C, i yılındaki nakit girişini göstermektedir. r iskonto oranı ve n proje ömrü olarak ifade edilmiştir. NBD değerini 0'a eşitleyip iskonto değeri hesapladığında ise, bulunan değer İVO'yu verir.

$$\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+\dot{I}VO)^i} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+\dot{I}VO)^i} \quad (11)$$

11 numaralı denkleme göre hesaplanan İVO değeri, iskonto değerinden yüksek ise projenin mali olarak kabul edilebileceği anlamına gelir ve bu değer ne kadar yükselirse mali olarak projenin getireceği kâr o kadar artmaktadır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

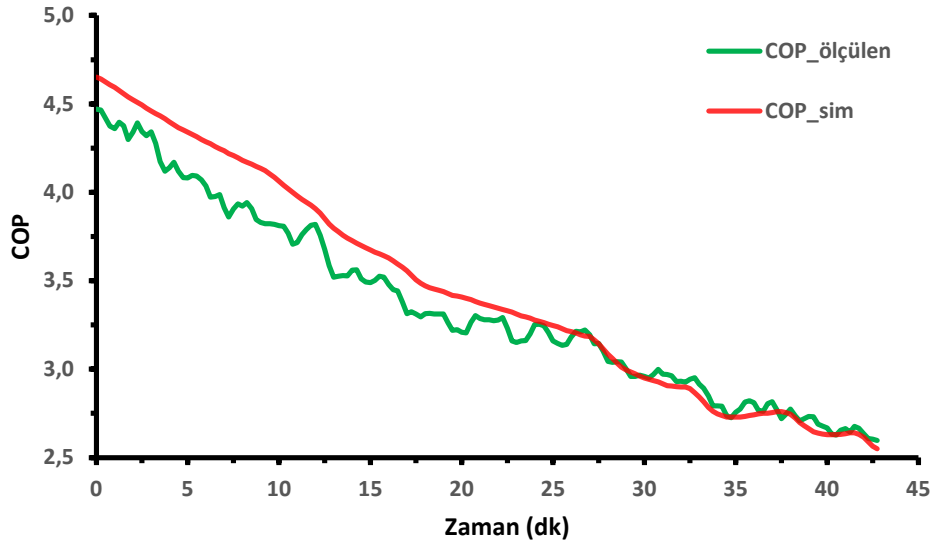
Bu çalışmada, sonuçlar iki ana bölümde analiz edilmiştir. Birinci bölümde, deneysel doğrulaması yapılan performans parametrelerine ait deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ise, farklı senaryolar altında güneş-ısı pompası modelinin enerji analizi sonuçları incelenmiştir.

Konuyla ilgili daha kısıtlı koşullarda yapılan en yüksek ortalama sapması %3,5 olan bir ön çalışmada, ortam sıcaklığı 15 °C'den 0 °C'ye düşürülmüş ve su deposundaki su 30 °C'den 50 °C'ye ısıtılmıştır. Bahsi geçen ön çalışma, “Gazi Üniversitesi Journal of Science Part C: Design and Technology” isimli dergide 29.12.2021 tarihinde yayınlanmıştır (Buyukzeren et al., 2021). İlgili çalışmanın sonuçları deneysel doğrulama modeli ön sonuçları başlığı altında ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1. Doğrulama Modeli Sonuçları

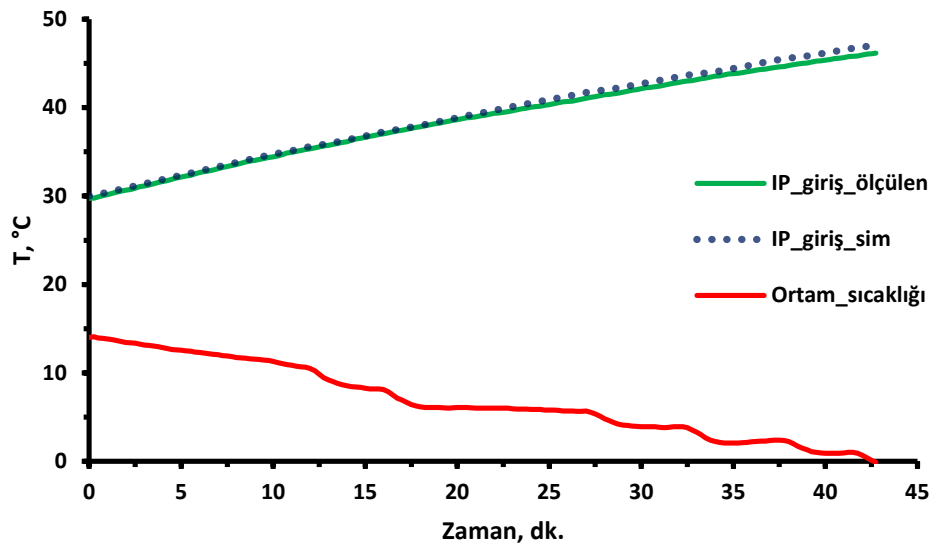
4.1.1. Deneysel Doğrulama Modeli Ön Sonuçları

Boyer, ısı pompası ve pompadan oluşan deneysel doğrulama sisteminde, kısıtlı koşullarda ve çalışmanın ön sonuçlarını görmek amacıyla yapılan deneylerin sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. COP, ısı pompası giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ortalama boyler sıcaklığı için deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırıldığı şekiller ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ön sonuçların alınması için yapılan deneyler 43 dakika sürmüştür ve her 15 saniyede bir veri alınarak sonuçlar oluşmuştur.



Şekil 4.1. Isı pompası performans katsayısı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması

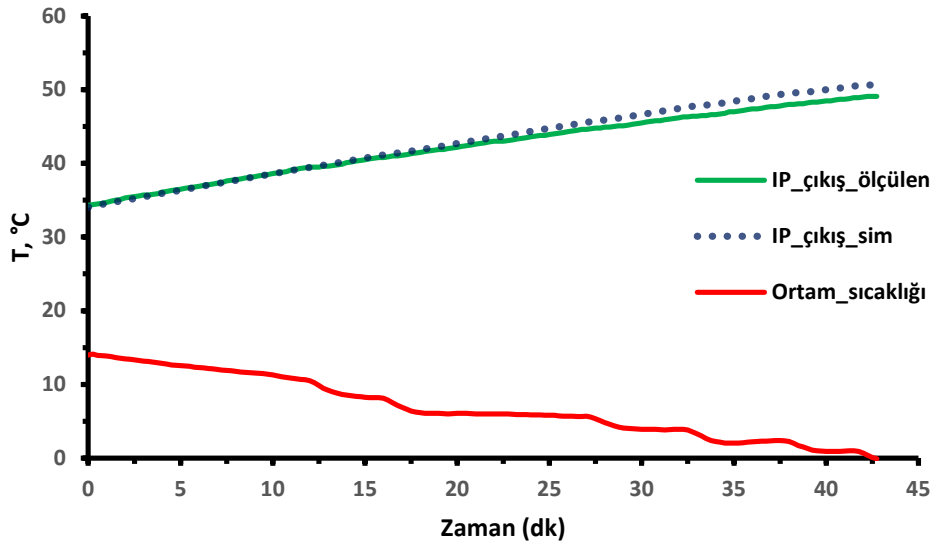
Şekil 4.1'de ısı pompasına ait performans katsayısı (COP) için ölçülen deneysel sonuçlar yeşil çizgi ile, simülasyon sonuçları ise kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. Genel olarak sonuçların eğilimlerinin uyduğu görülmektedir. Deneyin ilk 25 dakikasından sonra sapma yüzdesinin oldukça azaldığı görülmektedir. Çalışmanın başında ortam sıcaklığı 15 °C iken, performans katsayısının 4,5 civarında olduğu görülmektedir. Ortam sıcaklığının azalmasına ve ısıtılan suyun sıcaklığının zamanla artmasına bağlı olarak performans katsayısı değeri zamanla azalmaktadır. Performans katsayısı için ortalama sapma %3,5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Isı pompası giriş sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması

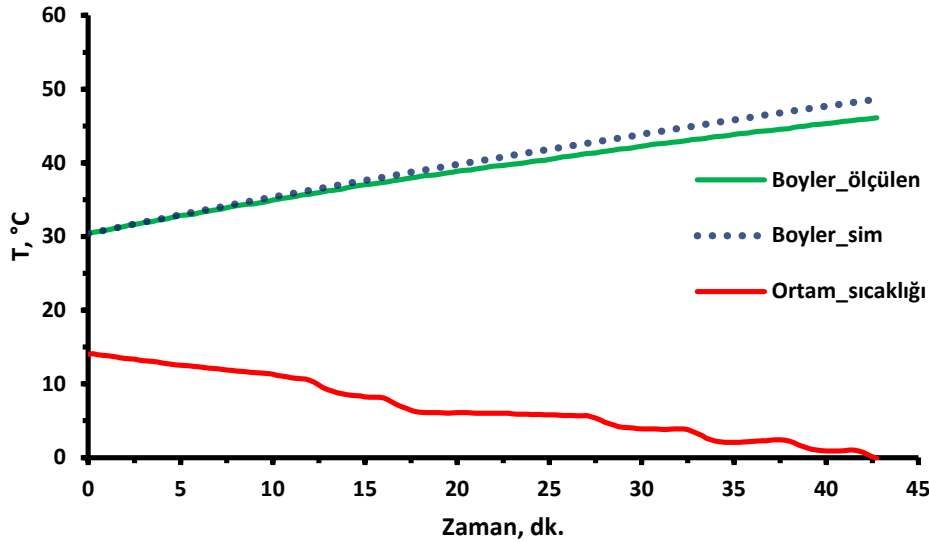
Isı pompasına giren suyun sıcaklığının ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar yeşil çizgi ile gösterilirken, simülasyon sonuçları

mavi renkli aralıklı noktalarla gösterilmiştir. Bunlara ek olarak ortam sıcaklığı kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. Isı pompasına giren su sıcaklığı, deneyin başında 29,7 °C olarak ölçülmüştür. Deney sonunda ilgili değer 46,2 °C'ye kadar çıkmıştır. Ortalama sapma yüzdesinin zamana bağlı olarak azda olsa arttığı görülmektedir. Isı pompası giriş sıcaklığı için deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, ortalama hata %1 olarak hesaplanmıştır. Literatürde yer alan hata yüzdeleri ile karşılaştırıldığında, oldukça kabul edilebilir bir sonuç alındığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması

Isı pompasından çıkan suyun sıcaklığının deneysel sonuçları ve simülasyon sonuçları, giren su sıcaklığına benzer şekilde Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Kırmızı çizgi ortam sıcaklığını, yeşil çizgi deneysel sıcaklığı ve aralıklı mavi noktalar ise simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Isı pompasına giren suyun sıcaklığından farklı olarak, deneyin sonuna doğru deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmektedir. İlk dakikalarda 34 °C'lerde seyreden ısı pompasından çıkan su sıcaklığı, deneyin sonunda 50 °C'ye yaklaşmıştır. Deneyin 40. dakikasından sonra hata yüzdesi %3'lerin üzerinde seyretse de, deneyin tamamı göz önünde bulundurulduğunda ortalama hata %1,5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Boyler ortalama sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon ön sonuçlarının karşılaştırılması

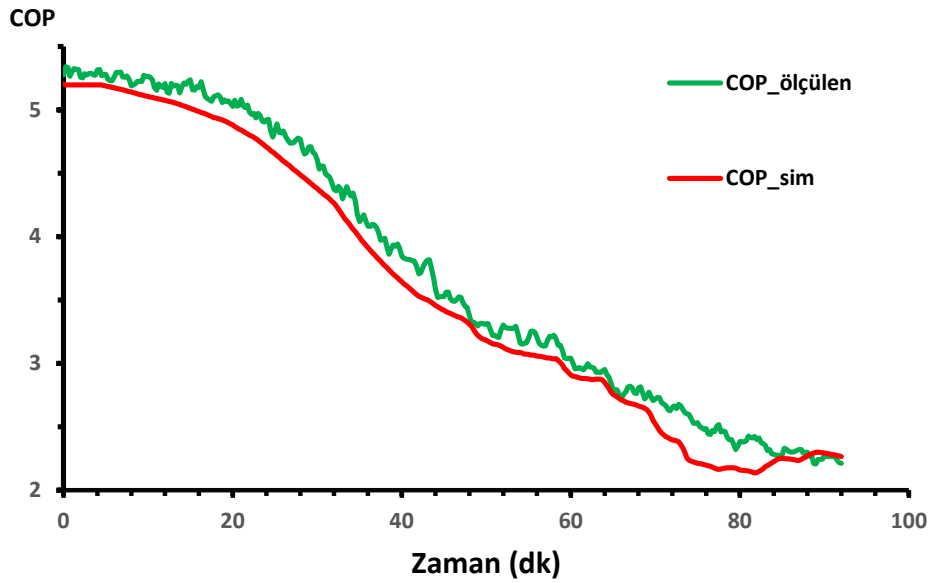
Isı pompasında ısınan suyun depolandığı ve tekrar ısı pompasına gelerek ısıtıldığı boylerin tam orta yüksekliğinden ölçülen ve simülasyon sonucu elde edilen değerler Şekil 4.4'te verilmiştir. Önceki şekillere benzer şekilde renklendirilmiştir. Isı pompasına giriş ve çıkış sıcaklıklarına benzer şekilde, deneyin sonuna doğru ölçülen ve simülasyon sonuçları arasındaki fark artmıştır. Deneyin sonuna doğru hata %5'i aşmıştır fakat ortalama hata %2,6 olarak hesaplanmıştır ve kabul edilebilir bir hata payıdır.

Deneysel doğrulama modeli ön sonuçlarında yer alan dört parametre içerisinde en yüksek ortalama hataya %3,5 ile COP sahip olurken, en düşük ortalama hata da %1 ile ısı pompası giriş sıcaklığı sahip olmuştur. Genel anlamda, ön sonuçların tatmin edici hata yüzdelerine sahip olduğu görülmüş ve deneyler boyunca büyük bir problemle karşılaşılmemiştir. Böylece, iklimlendirilen ortam sıcaklık aralığı ve ısıtılan suyun sıcaklık aralığı artırılarak, deney ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak üzere, deneysel doğrulama modeliyle deneylerin yapılması için zemin oluşturulmuştur.

4.1.2. Deneysel Doğrulama Modeli Sonuçları

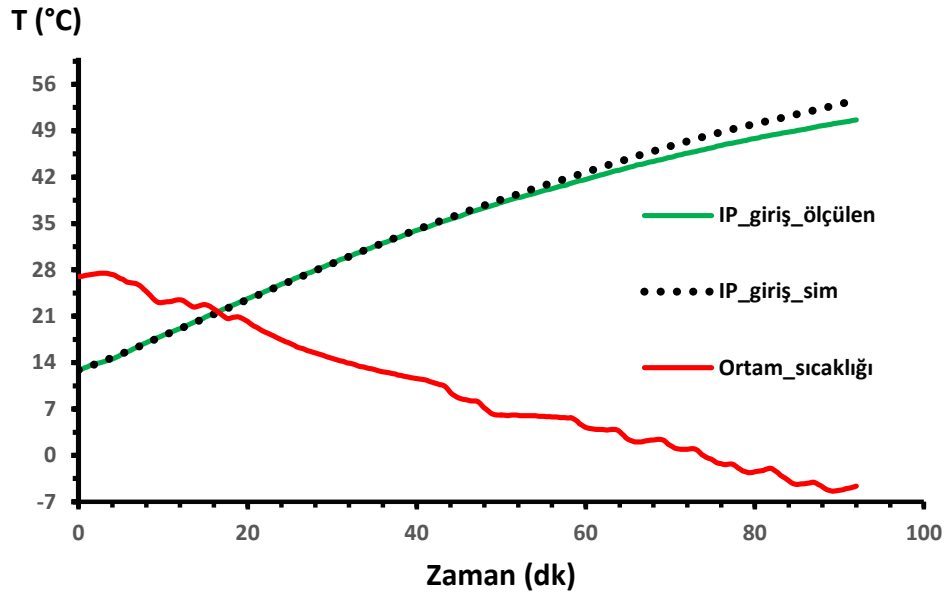
Boyer, ısı pompası ve pompadan oluşan deneysel doğrulama sisteminde, verileri doğrulamak içinde ön sonuçlarda olduğu gibi dört farklı parametre seçilmiştir. Bunlar sırasıyla hava kaynaklı ısı pompasına ait performans katsayısı (COP), ısı pompası giriş, çıkış sıcaklığı ve boyler ortalama sıcaklığıdır. Ön sonuçların alındığı deneylerde ortam sıcaklığı 15°C'den 0°C'ye düşürülürken, deneysel doğrulama modeli sonuçları için seçilen bölgenin sıcaklıklarını daha doğru bir şekilde analiz etmek için, ortam sıcaklığı

30 °C'den -7 °C'ye kadar düşürülmüştür. Modelde evsel sıcak su kullanımı için istenilen boyler sıcaklığının 50 °C olarak ayarlandığı önceki bölümlerde belirtilmişti. Sıcak suyun yoğun kullanıldığı zamanlarda bu sıcaklık değeri 40 °C'nin altına düşer ve bu düşüşlerde ısı pompası hemen devreye girer. Bunu doğru bir şekilde simüle etmek için, tank sıcaklığı 15°C'den 50°C'nin üzerine kadar çıkarılmıştır. Ayrıca, ön sonuçlar için yapılan deneyler toplamda 43 dakika sürüyorken, model sonuçları için yapılan deneylerin 92 dakika sürdüğü görülmektedir.



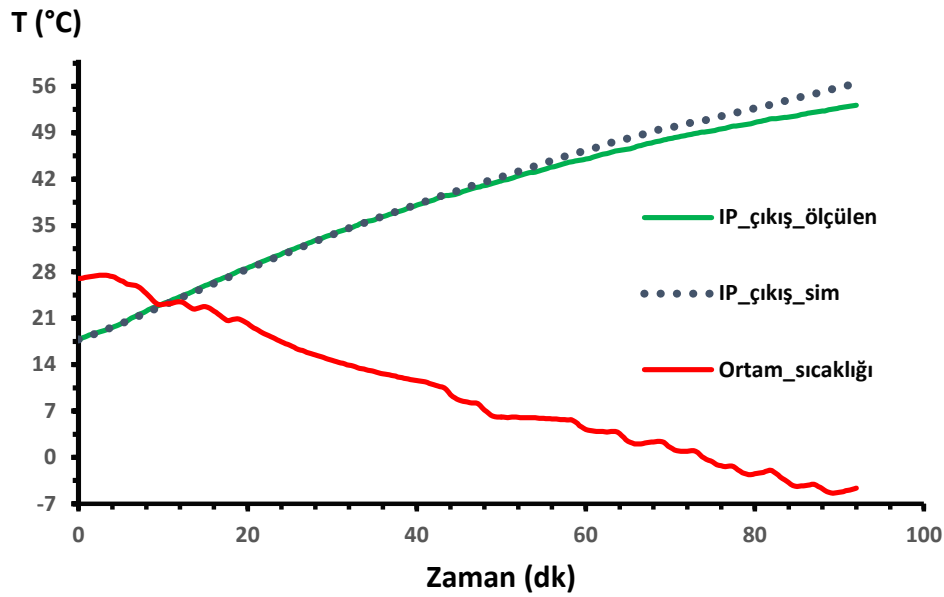
Şekil 4.5 Isı pompası performans katsayısı için ölçülen ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Hava kaynaklı ısı pompasına ait deneysel ve model ile elde edilmiş performans katsayıları Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır. Performans katsayısı değerlerinin; deney başlangıcında 5,2 iken, deney sonunda 2,2 civarına düştüğü görülmektedir. Bu sürekli düşüşün nedeni ortam sıcaklığının devamlı olarak düşürülüyor olmasıdır ve soğutulan ortamda ısı pompası performansının düşmesi beklenen bir durumdur. 92 dakika süren deneylerde ısı pompası sürekli ısıtma modunda çalıştırılmış ve deneyler boyunca hiç buz çözme (de-frost) moduna girmediği gözlemlenmiştir. Deneysel ve doğrulama modeli arasındaki ortalama sapma % 4,5'tir. Deneyin 68. ve 84. dakikaları arasında bu sapmanın %12'ye kadar arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, soğuk havalarda ısı pompasının daha düzensiz çalışmasıdır.



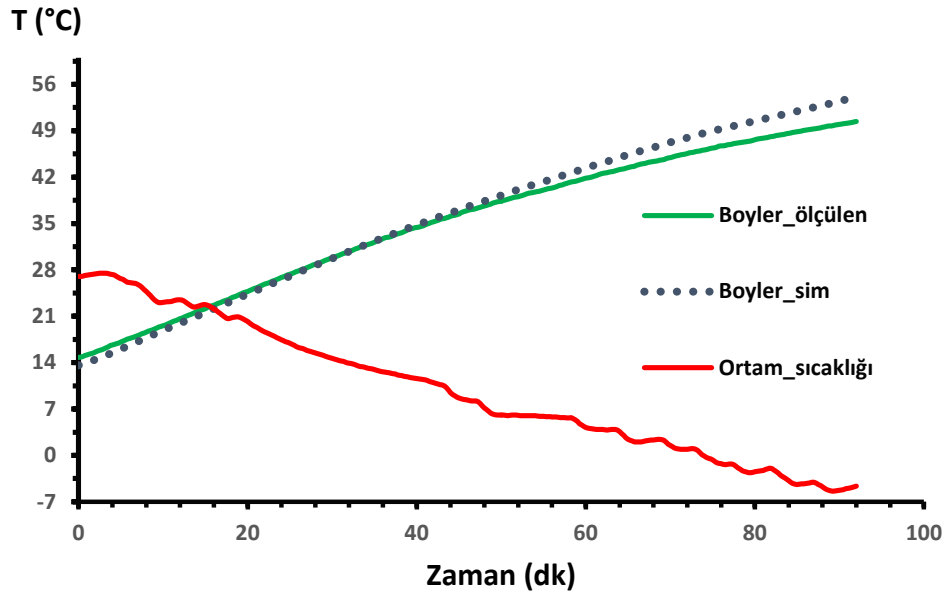
Şekil 4.6. Isı pompası giriş sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.6'da yer alan grafikte yeşil çizgi deneysel sonuçları temsil ediyorken, aralıklı noktalardan oluşan çizgi ise simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Ayrıca bu bölümdeki diğer şekillerde de aynı şekilde kullanılacak olan ortam sıcaklığının da kırmızı çizgi ile temsil edildiği görülmektedir. Ortam sıcaklığının azalmasının, küçük dalgalanmalar olsa da, lineer olarak gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, deneysel ve simülasyon değerlerin deneyin 52. dakikasına kadar neredeyse aynı sonuçlar olduğu görülmektedir. Bu dakikadan sonra görülmeye başlanan farklı değerler, deney sonunda %5,9 hata yüzdesine kadar ulaşmaktadır. Bu hata yüzdesinin temel nedeni, daha öncede belirtildiği üzere, soğuk havalarda ısı pompasının daha düzensiz çalışmasıdır. Deneysel doğrulama modeli sonuçları arasında yer alan ısı pompası giriş sıcaklığı parametresi için ortalama hata %1,9 olarak hesaplanmıştır ve bu değer doğrulama modeli parametreleri arasında, en düşük hata yüzdesine sahiptir.



Şekil 4.7. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması

Isı pompası çıkış sıcaklığı için ölçülen ve model sonuçlarının karşılaştırılmasına Şekil 4.7’de yer verilmiştir. Isı pompası çıkış sıcaklığının deneyin başında 17,8 °C olduğu görülürken, deneyin sonunda bu değer 53 °C’nin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu da 50 °C ayar sıcaklığıyla çalışacak bir boilerin modellenmesi için, yeterli bir doğrulama sıcaklığıdır. Isı pompasına giriş sıcaklığı için verilen grafiğe benzemesinin yanında, çıkış sıcaklığı için farklı deneysel değerler daha erken görülmeye başlamıştır. Bu nedenle deney sonunda görülen hata yüzdesinin oranı da yükselerek %6,2’ye ulaşmıştır. Bu parametre için ise ortalama hata %2 olarak hesaplanmıştır.



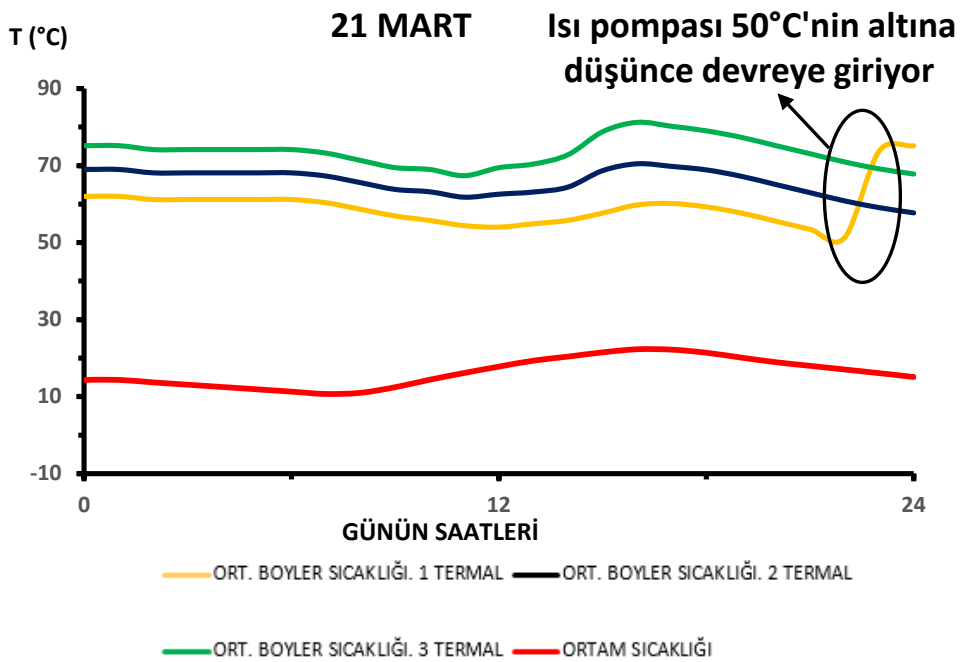
Şekil 4.8. Boyler ortalama sıcaklığı için ölçülen ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılması

Doğrulama için kullanılan son parametre olan boyler ortalama sıcaklığına ait deneysel ve simülasyon değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.8'de verilmiştir. Isı pompası giriş ve çıkış sıcaklıklarına ait doğrulama grafiklerinden farklı olarak, deney başında düşüğe olsa hatalar gözlemlenmektedir. Bu hataların deneyin ortasına doğru azalarak deneysel ve simülasyon değerlerinin 20. ve 40. dakikalar arasında neredeyse aynı olduğu görülmektedir. 40. dakikadan sonra ise aksi yönde hata yüzdesinin arttığı görülmektedir. Deney sonunda %7,3 değerine kadar ulaşan boyler ortalama sıcaklığına ait hata yüzdesi, tüm deney için ortalama olarak %3,5 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel doğrulama modeli sonuçlarında ele alınan dört farklı parametrenin sonuçlarını özetlersek; COP, ısı pompası giriş, çıkış sıcaklığı ve boyler ortalama sıcaklıklarının doğrulamasının yapıldığı modeller için ortalama yüzdeleri sırasıyla %4,5, %1,9, %2 ve %3,5 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin, literatürde yer alan doğrulama çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, başarılı ve kabul edilebilir değerler olduğu görülmektedir. Simülasyonu yapılacak iklimdeki en yüksek ve en düşük ortalama sıcaklıkların göz önüne alınması ve yine simülasyon yapılacak olan boyler sıcaklıklarının tümünde testlerin yapılmış olması, deneyin doğruluğunu arttıran diğer unsurlardır.

4.2. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Modeli Sonuçları

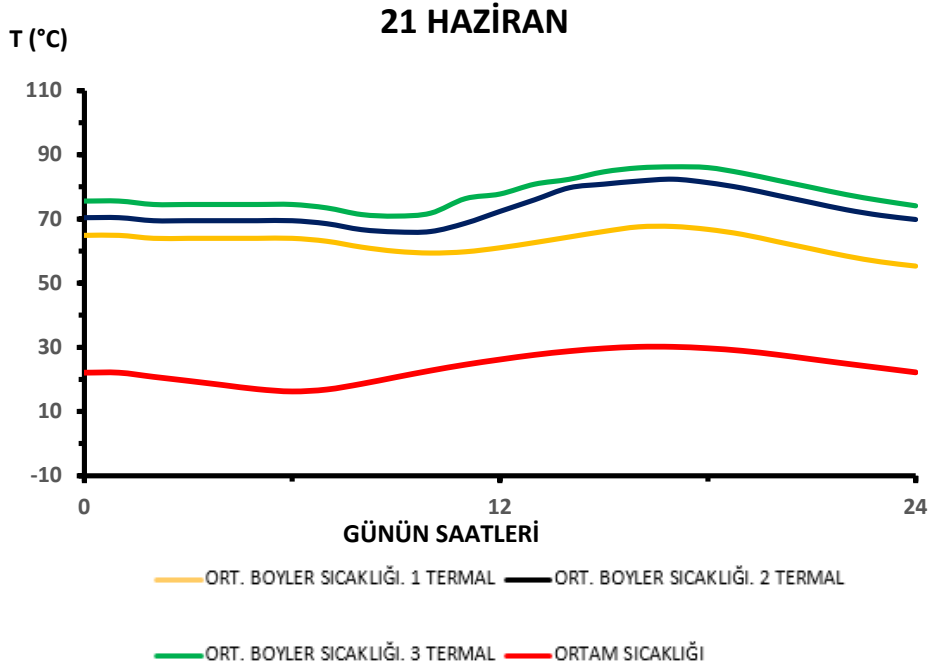
Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boyler sıcaklıklarını göstermektedir. Dört farklı mevsimden üçer aylık aralıklarla yılın en uzun gündüzü ve gecesi de dâhil olmak üzere dört farklı tarih seçilmiştir. Grafiklerde kırmızı çizgiler o güne ait hava sıcaklığını, sarı çizgiler 1 termal kolektör tarafından desteklenen sistemleri, mavi çizgiler 2 ve yeşil çizgiler 3 termal kolektör tarafından desteklenen sistemleri göstermektedir. Grafiklere ilk baktığımızda yer yer dikey artışlar dikkat çekmektedir. Bu artışların nedeni, boyler sıcaklığının istenen sıcaklık olan 50 °C'nin altına düşmesi ve bu nedenle ısı pompasının kontrolörler vasıtasıyla hemen devreye girmesidir. Isı pompası bir saat çalıştıktan sonra tanktaki su istenilen sıcaklık ve üzerinde olursa, ısı pompası kontrolör tarafından devre dışı bırakılır.



Şekil 4.9. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boyler sıcaklıkları (21 Mart)

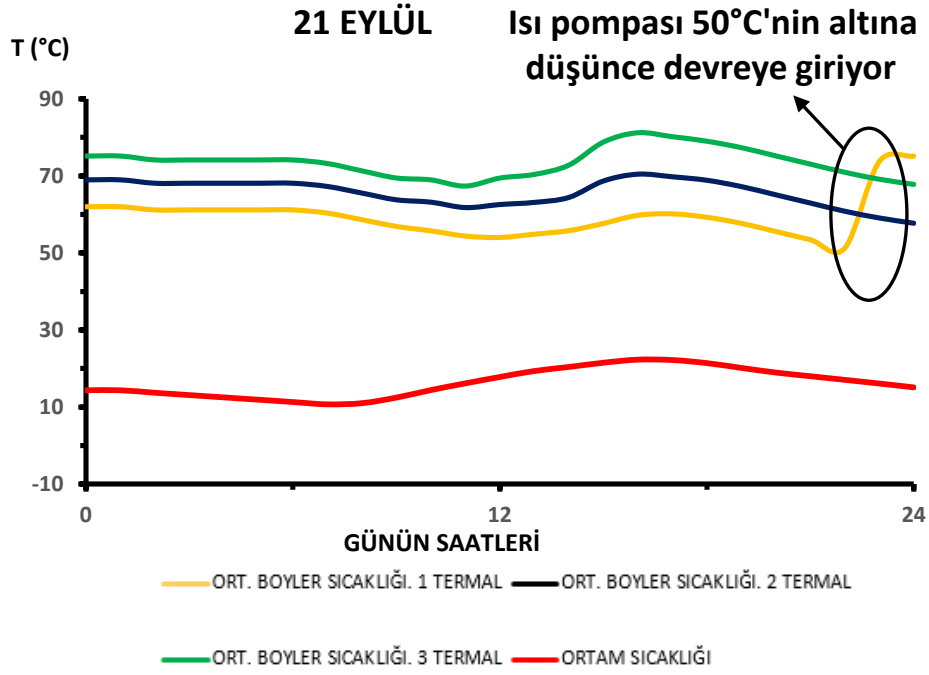
Şekil 4.9'u daha detaylı incelediğimizde Mart ayında tek termal kolektörle desteklenen sistemde ısı pompasının günde bir kez devreye girdiğini görüyoruz. Diğer sistemler ise, Mart ayında evsel sıcak su ihtiyacını ısı pompasına ihtiyaç duymadan yani sadece termal kolektör desteği ile karşılamıştır. 21 Mart tarihinde hava sıcaklığının 10 °C ile 20 °C arasında değiştiği görülmektedir. Bunun sonucunda ısı pompasının kış aylarına göre daha performanslı çalıştığı görülmektedir. Tek termal kolektörde yer alan ısı

pompasının devreye girdiği yükselişin eğiminin yüksek olması, ısıtma suyunun daha hızlı ısındığına işaretir veya başka bir söylemle, ısı pompasının daha yüksek verimde çalıştığını göstermektedir.



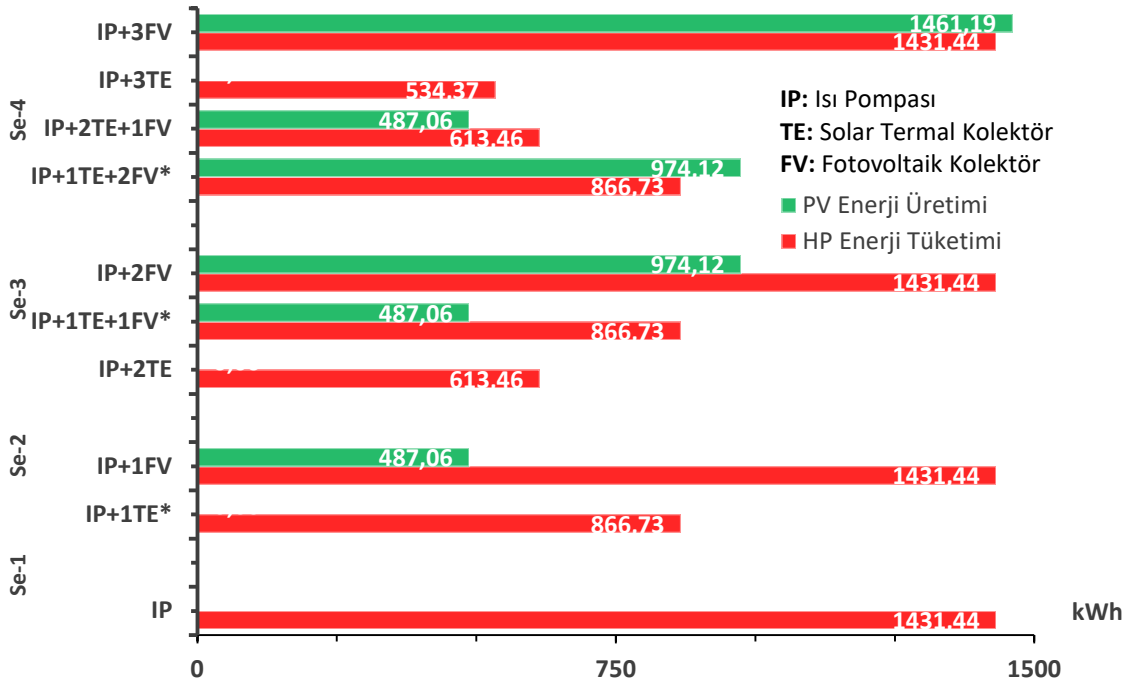
Şekil 4.10. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Haziran)

21 Haziran tarihini gösteren Şekil 4.10'u incelediğimizde, ısı pompası hiç devreye girmemekte ve ortalama boiler sıcaklığı da termal güneş kolektörü sayısına bağlı olarak yükselmektedir. Ayrıca bu ay için hava sıcaklığının 30 °C'yi geçmesi ve buna bağlı olarak 3 kolektöre sahip sistemin ortalama tank sıcaklığının 90 °C'ye ulaşması dikkat çeken noktalar arasındadır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi bu sıcaklığın üzerinde buharlaşmayı önlemek için termal kolektör çevriminde yer alan pompa, kontrolör tarafından devre dışı bırakılır. Üç termal kolektöre sahip sistemin, sistemin ihtiyacı olan ısıtmanın üzerinde bir ısıtma sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda, belirtilen tarihte hava sıcaklığının genel olarak 20 °C'nin üzerinde seyrettiği görülmektedir. Bu da, ısı pompasına ihtiyaç olursa, cihazın oldukça yüksek verimde çalışabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 4.11. Farklı sayıda termal kolektöre sahip güneş – ısı pompası sistemlerinin günlük ortalama boiler sıcaklıkları (21 Eylül)

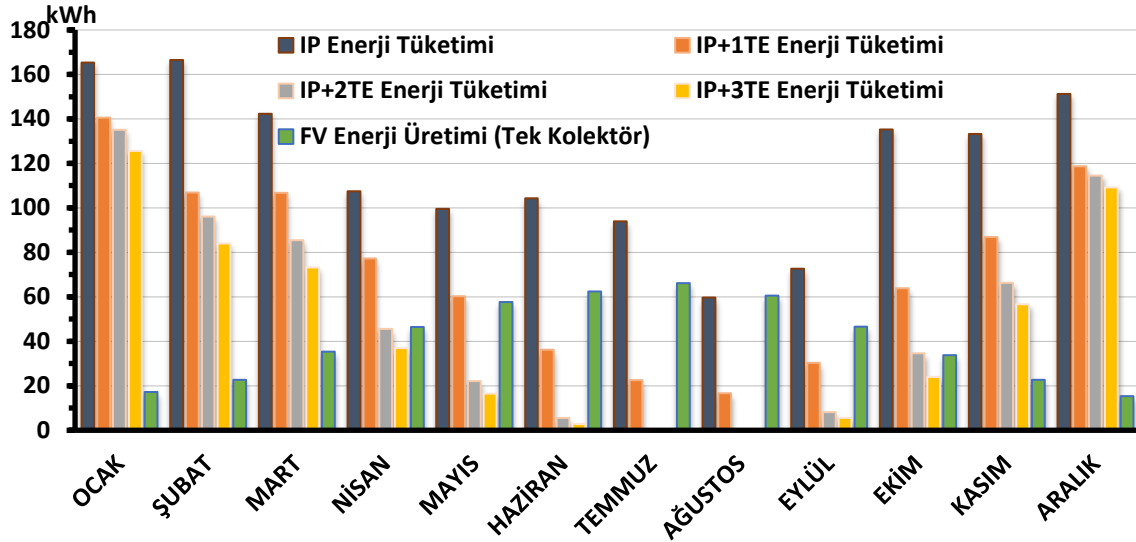
21 Eylül tarihi için verilen Şekil 4.11’de, ortalama ortam sıcaklığı Mart ayına göre biraz daha yüksek olsa da 10 °C ile 20 °C arasında seyrettiği görülmektedir. Farklı senaryolara ait ortalama tank sıcaklıkları her iki durum için benzerdir. Saat 22.00 dolaylarında tek termal kolektöre sahip sistemin ortalama boiler sıcaklığının 50 °C’ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu noktada, ısı pompasının devreye girdiği gözlemlenir. İki ve üç termal kolektöre sahip sistemlerin, evsel sıcak su ihtiyacını ısı pompasına ihtiyaç duymadan karşılayabildiği ve sistemlerin beklenen şekilde çalıştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.13. Farklı senaryolara göre yıllık enerji üretim ve tüketimi (kWh-e)
*:Üretim ve tüketim değerleri göz önünde bulundurulduğunda en verimli sistem

Şekil 4.13'teki çubuk grafik, evsel sıcak su ihtiyacı için kullanılan güneş - ısı pompası sistemleri için farklı sayıdaki fotovoltaik ve termal kolektör konfigürasyonlarını karşılaştırır. Materyal ve yöntem bölümünde belirtildiği gibi, dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Se-1 bağımsız ısı pompası evsel sıcak su sistemidir ve enerji tüketimi yılda 1431 kWh-e'dir. Se-2 için, tek termal kolektör ve tek fotovoltaik kolektörle desteklenen iki farklı ısı pompası sistemi karşılaştırılmıştır. Tek bir termal kolektör, evsel sıcak su ihtiyacı için kullanılan ısı pompası sistemi için yılda 565 kWh-e tasarruf sağlar. Bunun yanı sıra tek fotovoltaik kolektör, sistem için 487 kWh-e tasarruf sağlar. Se-2 için en iyi seçenek, tek termal kolektör desteğidir (IP+1TE). Se-3'te sistem toplamda iki kolektör tarafından desteklenmektedir. Bu durumda önemli olan nokta, iki termal kolektör tarafından desteklenen sistemin, bir fotovoltaik ve bir termal kolektör tarafından desteklenen sisteme göre daha fazla elektrik tüketmesidir. Fotovoltaik kolektörün ürettiği elektriğin burada dikkate alındığının altı çizilmelidir. İki fotovoltaik kolektör tarafından desteklenen sistem bile iki termal kolektör tarafından desteklenen sistemden daha az enerji tüketir. Sonuç olarak, Se-3'teki en iyi seçenek, termal ve fotovoltaik kolektör (IP+1TE+1FV) tarafından desteklenen sistemdir. Se-4'te sistem toplamda üç kolektör tarafından desteklenmektedir ve fotovoltaik kolektörlerden üretilen enerjinin, sistemin tükettiği enerjiden fazla olduğu durumlar vardır. Üç adet fotovoltaik kolektör tarafından

desteklenen sistemde enerji üretimi, enerji tüketiminden 30 kWh daha fazla olmasına rağmen, bu senaryodaki enerjiler olarak en verimli seçenek, bir adet termal ve iki adet fotovoltaik kolektörün (IP+1TE+2FV) kullanıldığı ve üretilen elektrik enerjisinin, sistemin tüketiminden 108 kWh daha fazla olduğu sistemdir.



Şekil 4.14. kWh-e cinsinden farklı sistemlere göre aylık enerji üretimi ve tüketimi

Şekil 4.14'te verilen çubuk grafik, tüm yıl boyunca aylık bazda farklı sistemlerin enerji tüketimini ve üretimini göstermektedir. Sonuç olarak, güneş desteği olmayan ısı pompası sisteminin enerji tüketimi, herhangi bir kolektör tarafından desteklenmediği için tüm ayların en yüksek tüketimine sahiptir. Sistemlerde termal kolektör sayısının artması ile ısı pompasının tükettiği enerji beklendiği gibi azalmaktadır. Bu tablodaki verilerle ilgili dikkat çekici nokta, ısı pompasının IP+2TE ve IP+3TE sistemleri için Temmuz ve Ağustos aylarında hiç çalışmamış olmasıdır. Diğer bir ifadeyle, gerekli tüm ısının kolektörler tarafından karşılandığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, bağımsız PV üretiminin yaz aylarında beklendiği gibi arttığı ve 60 kWh-e'yi aştığı, kışın ise 20 kWh-e'nin altına düştüğü görülmektedir. Ayrıca güneş kolektörleri ile desteklenen sistemlerin tükettiği enerjide de Ekim ayında, aynı mevsimde yer alan diğer aylara göre daha fazla düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni, bu ay ortam sıcaklığı düşmesine rağmen, güneş radyasyonunun şiddeti halen boylardaki suyu ısıtacak kadar yüksek olmasıdır.

4.3. Ekonomik Analiz Sonuçları

Bu tez çalışmasında, evsel sıcak su ısıtması gerçekleştirmek için kullanılan güneşten ve hava kaynaklı ısı pompasından yararlanan sistemler incelenmiştir. Yapılan ekonomik analiz çalışması, kendi başına evsel sıcak su ısıtması sağlayan bir hava-su kaynaklı ısı pompasına eklenecek güneş panellerine yönelik yapılmıştır. Bu panellerin, hangisinin finansal olarak daha faydalı olduğu, geri ödeme süreleri 3.6 numaralı başlık altında belirtilen NBD ve İVO yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda Şekil 4.14'te verilen üretilen ve tüketilen enerji miktarları esas alınmıştır. Kendi başına evsel sıcak su ısıtması gerçekleştiren bir ısı pompasının senelik elektrik tüketiminin 1431,44 kWh olduğu daha önce hesaplanmıştır. Bu sisteme, termal veya fotovoltaiik paneller ekleme ile sistemin elektrik enerjisi tüketimi azaltılarak, kazanç elde edilmiştir. Ekonomik analizler gerçekleştirilirken kullanılan sistem bileşenlerine ait maliyetler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Sistem bileşenleri ve maliyetleri

Sistem Bileşenleri	Fiyat	Birim
Termal Kolektör Adet Fiyatı – Solimpeks Wunder ANSG 1808	137	€
Fotovoltaiik Kolektör Adet Fiyatı – Winasol M3 330W	135	€
Termal Sistem Montaj, İşçilik, Malzeme Fiyatı (3 Kolektöre Kadar)	100	€
Fotovoltaiik Sistem Montaj, Evirici (1kW), Şebeke Bağlantısı, İşçilik, Malzeme Fiyatı (3 Panele Kadar)	300	€

Bunlara ek olarak iskonto oranı 0,08, sistem ömrü 20 yıl kabul edilmiş ve konutlarda kullanılan elektrik fiyatı ise 1 Nisan 2022'de EPDK tarafından güncellenen listede günlük 8 kWh üzeri birim bedeli olan 0,13€/kWh olarak alınmıştır. Materyal ve Yöntem bölümünde belirtildiği üzere, dört farklı senaryo oluşturulmuştu. Bu senaryoların ilki, yalnız başına çalışan hava kaynaklı ısı pompası ile evsel sıcak su ısıtılması idi. Diğer senaryolarda ise aynı sisteme farklı güneş kolektör konfigürasyonları dâhil edilmiş idi. Güneş kolektörlerinin yer aldığı tüm farklı senaryolar için ekonomik analiz yapılmış ve sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı senaryolara göre ekonomik analiz sonuçları

Senaryo	Konfigürasyon	İlk Yatırım Bedeli (€)	Net Bugünkü Değer (€) NBD	İç Verim Oranı (%) İVO	Geri Ödeme Süresi (Yıl)
Se-4	IP + 3FV*	705	1865	0,267	4,6
	IP + TE + 2 FV	807	1964,1	0,245	5,1
	IP + 2 TE + FV	809	1665,7	0,205	6,2
	IP + 3 TE	511	1144,98	0,224	5,6
Se-3	IP + 2 FV	570	1243,33	0,218	5,8
	IP + TE + FV	672	1342,43	0,198	6,5
	IP + 2 TE*	374	1044	0,282	4,3
Se-2	IP + FV	435	621,66	0,134	10,4
	IP + TE*	237	720,77	0,308	3,9
Se-1	IP	Kolektörler, bu sisteme eklenmiştir. Tabloda yer alan geri ödeme süresi, kolektörlerin geri ödeme süresidir.			

Önceki bölümde tüm konfigürasyonlara ait, enerji analizi sonuçları verilmişti. Buna göre, Se-2’de IP+TE, Se-3’te IP+TE+FV ve Se-4’te IP+TE+2FV konfigürasyonları enerjik açıdan en verimli çalışan sistemlerdir. Fakat bu sistemleri, ekonomik açıdan incelediğimiz zaman en ekonomik sistemin, en verimli sistem olmadığı durumlar görülmektedir. Tablo 4.2’de verilen senaryolarda, ekonomik olarak en avantajlı olan konfigürasyonun yanına * işareti eklenmiştir. Buna göre Se-2’de en ekonomik konfigürasyon IP+TE, Se-3’te IP+2TE ve Se-4’te ise IP+3FV’dir.

Kullanılan termal ve fotovoltaik panellerin fiyatlarının birbirine oldukça yakın olduğu Tablo 4.1’de görülmektedir. Fakat montaj, işçilik, evirici gibi yardımcı malzemeler hesaba katıldığında, enerjik olarak en verimli olan sistem, ekonomik olarak en avantajlı sistem olmamaktadır. Örneğin, piyasada bulunan şebeke bağlantılı en küçük kapasiteli evirici 1 kW kapasitededir. Yani, senaryolarda 1 veya 3 adet fotovoltaik kullanımında evirici için ayrılan nakit aynıdır. Diğer yandan, yine aynı tabloda fotovoltaik sistemlere ait montaj, işçilik, evirici vs. ücretlerinin termal sistemlere göre üç kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Tüm bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda, eğer bir panelle ısı pompası desteklenecek ise termal panel, iki panel ile desteklenecekse iki termal panel ve üç panel ile desteklenecek ise üç fotovoltaik panel ile desteklenmesi ekonomik açıdan tavsiye edilir.

4.4. Deneyin Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada yer alan verilerin doğru yorumlanması için hata analiz yöntemlerinden olan belirsizlik analizinden yararlanılmıştır. n adet bağımsız değişkeni olan bir ölçüme R ölçülecek boyut, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ölçümü etkileyen değişkenler olup, $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ bağımsız değişkenlerle ilgili hata oranı ise toplam hata oranı W_R aşağıdaki gibi tanımlanır (Abernethy et al., 1983):

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} W_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Deneyler sırasında ısı pompasının çektiği güç, yoğunlaştırucudan geçen suyun debisi ve yoğunlaştırucu giriş ve çıkışında suyun sıcaklığı ölçülmüştür. Debi ölçümü %0,001, sıcaklık ölçümleri %0,1 ve güç ölçümü %0,1 belirsizliğe sahiptir. Buna göre ısı pompası performans katsayısına ait belirsizlik Şekil 3.12’de verilen değerler referans alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$COP_{IP} = \frac{Q_{yoğusturucu}}{W_{net}} = \frac{\dot{m}_{su} c_{p,su} (T_{su,çıkan} - T_{su,giren})}{W_{net}} \quad (4.2)$$

$$W_{COP} = \left[\left(\frac{\partial COP}{\partial \dot{m}} \dot{m} \right)^2 + \left(\frac{\partial COP}{\partial T_c} T_c \right)^2 + \left(\frac{\partial COP}{\partial T_g} T_g \right)^2 + \left(\frac{\partial COP}{\partial W_{net}} W_{net} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$W_{COP} = \left[\left(\frac{0,001}{1,32} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{34,1} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{31,6} \right)^2 + \left(\frac{0,01}{1729,36} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

$$W_{COP} = 0,004314 \quad (4.5)$$

$$\frac{W_{COP}}{COP} = \frac{0,004314}{2,21} \times 100 = \%1,95 \quad (4.6)$$

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, evsel sıcak su ısıtmasında kullanılan ısı pompası sistemi ile birlikte farklı çatı alanına sahip evlere yönelik, kolektör sayısı ve tipinin en iyi seçeneğini belirlemek amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar Solimpeks firmasında gerçekleştirilmiş ve simülasyonlar için TRNSYS yazılımı kullanılmıştır. Simülasyon modelini doğrulamak için deneysel veriler kullanılmıştır. Isı pompasının performans katsayısı (COP), ortalama boyler sıcaklığı, ısı pompası giriş ve çıkış sıcaklığı parametreleri doğrulanmıştır. Daha sonra Konya ili koşulları için farklı senaryolar altında yıllık simülasyonlar yapılmıştır. Hem termal hem de elektrik enerjisi talebini karşılamak amacıyla farklı sayıda termal ve fotovoltaik kolektörler kullanılarak senaryolar oluşturulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen ana bulgular şunlardır:

- Simüle edilen modelde dört farklı parametre doğrulanmış ve en yüksek ortalama sapma %4,5 olarak hesaplanmıştır. Diğer parametreler için ortalama sapma en yüksek %3,5'tur. Bu değerler literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça kabul edilebilir bir aralıktadır.

- Dört farklı senaryo simüle edilmiştir ve senaryolar, yalnızca ısı pompası tarafından desteklenen, diğerleri ise sırasıyla bir ısı pompasının yanında bir, iki ve üç kolektör tarafından desteklenen sistemleri göstermektedir. Sistemlerin tükettiği elektrik enerjisi değerleri karşılaştırılmıştır.

- Güneş enerjisi ile desteklenmemiş bağımsız ısı pompası sistemi 1431,44 kWh-e enerji tüketmiştir. Tek kolektöre sahip bir ısı pompası sistemi için en az elektrik tüketen sistem, 866,73 kWh-e ile bir termal kolektör tarafından desteklenen sistemdir.

- İki kolektöre sahip ısı pompası sistemlerinin enerji analizi sonucunda, bir fotovoltaik ve bir termal kolektöre sahip ısı pompası sistemi 379,67 kWh-e tüketimi ile en iyi performansı göstermiştir.

- Üç kolektöre sahip ısı pompası sistemlerinin enerji analizi değerlendirilirken, bir termal-iki fotovoltaik kolektöre sahip sistem, iki termal-bir fotovoltaik kolektöre sahip sistem, üç termal kolektöre sahip sistem ve üç fotovoltaik kolektöre sahip sistem karşılaştırılmıştır. Bu dört seçeneğe ait enerji analizleri sonucunda, bir termal-iki fotovoltaik kolektöre sahip sistem, 107,39 kWh-e üretimiyle en iyi performansı göstermiştir.

- Aynı senaryolara göre yapılan ekonomik analiz sonuçlarına göre, bir kolektörle desteklenen ısı pompası sisteminde termal kolektör 3,9 yıl geri ödeme süresi ile, iki kolektörle desteklenen ısı pompası sisteminde iki termal kolektör 4,3 yıl geri ödeme süresi ile ve üç kolektörle desteklenen ısı pompası sisteminde üç fotovoltaik kolektör 4,6 yıl geri ödeme süresi ile en kârlı sistemler olmuştur.

Bu sonuçlar birlikte ele alındığında, evsel sıcak su ihtiyacının güneş - ısı pompalarından sağlandığı sistemlerde çatı alanına göre farklı güneş kolektörlerinin tip ve sayısının seçilmesi, sistemin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

- Yapılması planlanan çalışmalar için farklı tipte güneş kolektörlerinin, deneylere ve senaryolara dâhil edilmesi tavsiye edilir.
- Gelecek çalışmalar için enerji-ekonomi analizlerinin yanında, ekserji ve çevresel analizlerinde yapılması tavsiye edilir.
- Farklı lokasyonlar için karşılaştırmalı analizlerin yapılması, bölgelerin ısı pompası kullanımı için uygunluğunu görme açısından önemlidir.

6. KAYNAKLAR

- 2H Energy, n.d. Winasol 340W Datasheet [WWW Document]. URL <https://www.arerenerji.com/wp-content/uploads/2021/05/2h-enerji-winasol-60-M3-340-W-watt-monokristal-solar-gunes-paneli-datasheet-tr.pdf> (accessed 1.3.22).
- Abernethy, R.B., Benedict, R.P., Dowdell, R.B., 1983. Asme Measurement Uncertainty. Am. Soc. Mech. Eng. 107 83 .
- Biezma, M. V., San Cristóbal, J.R., 2006. Investment criteria for the selection of cogeneration plants - A state of the art review. Appl. Therm. Eng. 26 5–6 , 583–588. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.07.006
- Buker, M.S., Riffat, S.B., 2016. Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review. Renew. Sustain. Energy Rev. 55, 399–413. doi:10.1016/j.rser.2015.10.157
- Buyukzeren, R., Kahraman, A., Kaya, M.N., Dag, H.I., 2021. Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump. Gazi Univ. J. Sci. PART C Des. Technol. 9 4 , 739–748. doi:10.29109/gujsc.1002791
- Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, M., 2019. Thermodynamics an Engineering Approach. Ninth Edition.2019.
- Choi, H., Kim, Y., Son, C., Yoon, J., Choi, K., 2020. Experimental study on the performance of heat pump water heating system coupled with air type PV / T collector. Appl. Therm. Eng. 178 Kasım 2019 , 115427. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115427
- Dannemand, M., Sifnaios, I., Tian, Z., Furbo, S., 2020. Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic-thermal collector and heat pump system with two storage tanks. Energy Convers. Manag. 206 October 2019 , 112429. doi:10.1016/j.enconman.2019.112429
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., 2006. Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. Energy Convers. Manag. 47 9–10 , 1281–1297. doi:10.1016/j.enconman.2005.06.024
- Fan, Y., Zhao, X., Han, Z., Li, J., Badiei, A., Akhlaghi, Y.G., Liu, Z., 2021. Scientific and technological progress and future perspectives of the solar assisted heat pump (SAHP) system. Energy 229 2021 , 120719. doi:10.1016/j.energy.2021.120719

- Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası [WWW Document], n.d. . Enerj. İşleri Genel Müdürlüğü. URL <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (accessed 5.23.22).
- Hadorn, J.-C., 2015. *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*, Ernst & Sohn. Ernst & Sohn, Geneva.
- Haller, M.Y., Haberl, R., Persson, T., Bales, C., Kovacs, P., Chèze, D., Papillon, P., 2013. Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art. *Energy Build.* 66, 667–677. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.052
- Hobbi, A., Siddiqui, K., 2009. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Sol. Energy* 83 5 , 700–714. doi:10.1016/j.solener.2008.10.018
- Kalogirou, S.A., 2004. Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science.* doi:10.1016/j.pecs.2004.02.001
- Kannan, N., Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 1092–1105. doi:10.1016/j.rser.2016.05.022
- Kim, T., Choi, B., Han, Y., Hyung, K., 2018. A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system. *Energy Convers. Manag.* 172 Temmuz , 472–484. doi:10.1016/j.enconman.2018.07.035
- Lee, M., Lee, D., Park, M.H., Kang, Y.T., Kim, Y., 2022. Performance improvement of solar-assisted ground-source heat pumps with parallelly connected heat sources in heating-dominated areas. *Energy* 240, 122807. doi:10.1016/j.energy.2021.122807
- Lefley, F., 1996. The payback method of investment appraisal: A review and synthesis. *Int. J. Prod. Econ.* 44 3 , 207–224. doi:10.1016/0925-5273(96)00022-9
- Lyden, A., Tuohy, P.G., 2022. Planning level sizing of heat pumps and hot water tanks incorporating model predictive control and future electricity tariffs. *Energy* 238, 121731. doi:10.1016/j.energy.2021.121731
- Malenković, I., 2012. REVIEW ON TESTING AND RATING PROCEDURES FOR SOLAR THERMAL AND HEAT PUMP SYSTEMS AND COMPONENTS.
- Osborne, M.J., 2010. A resolution to the NPV – IRR debate? 50, 234–239. doi:10.1016/j.qref.2010.01.002
- Öztürk, M., Çalışır, O., Genç, G., 2021. Energy , exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic / thermal collector - assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *J. Therm. Anal. Calorim.* 145 3 ,

- 1431–1443. doi:10.1007/s10973-021-10675-9
- Pomianowski, M.Z., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A., Zhang, C., 2020. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 128 May , 109900. doi:10.1016/j.rser.2020.109900
- Poppi, S., Sommerfeldt, N., Bales, C., Madani, H., Lundqvist, P., 2018. Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 July 2017 , 22–32. doi:10.1016/j.rser.2017.07.041
- Ruiz-calvo, F., Montagud, C., Cazorla-mar, A., 2017. Development and Experimental Validation of a TRNSYS Dynamic Tool for Design and Energy Optimization of Ground Source Heat Pump Systems. *Energies.* doi:10.3390/en10101510
- Ruschenburg, J., Herkel, S., Henning, H.M., 2013. A statistical analysis on market-available solar thermal heat pump systems. *Sol. Energy* 95, 79–89. doi:10.1016/j.solener.2013.06.005
- Solimpeks Corp., n.d. Product Catalogue [WWW Document]. URL <https://solimpeks.com/catalogue.pdf> (accessed 1.3.22).
- Sterling, S.J., Collins, M.R., 2012. Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted solar domestic hot water system. *Appl. Energy* 93, 11–17. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.050
- TESS, 2014. TESSLibs 17 Libraries for the TRNSYS Simulation Environment.
- The Solar Energy Laboratory, 2006. TRNSYS.
- Turkish State Meteorological Service, n.d. Extreme maximum, minimum and average temperatures measured in long period (°C) [WWW Document]. URL <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=KONYA> (accessed 12.22.21).
- Yalun, M., Li, B., Liu, C., Su, S., Xiao, H., Zhu, C., 2020. Design and experimental investigation of a phase change energy storage air- type solar heat pump heating system. *Appl. Therm. Eng.* 179 May , 115506. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115506
- Yenilenebilir Enerji - Güneş [WWW Document], n.d. . T.C. Enerj. ve Tabii Kaynaklar Bakanl. URL <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (accessed 5.23.22).
- Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., Cai, B., Huang, J., 2017. Experimental research of an air-source heat pump water heater using water- PCM for heat storage. *Appl. Energy* 206 January , 784–792. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.209

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Rıza BÜYÜKZEREN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Meram 18.01.1989
Telefon : 0 530 040 40 11
e-mail : rbuyukzeren@erbakan.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Meram Anadolu Lisesi, Meram, KONYA	2007
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2011
Yüksek Lisans	: Brunel Üniversitesi, Uxbridge, LONDRA	2014
Doktora	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram, KONYA	2022

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015-Halen	Necmettin Erbakan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Isı pompası, yenilenebilir enerji, güneş enerji sistemleri, TRNSYS

YABANCI DİLLER

İngilizce – YÖKDİL – 77,5

YAYINLAR

- Büyükzeren, R. , Altıntaş, H. B. , Martin, K. & Kahraman, A. (2016). Binalardaki Fotovoltaik Uygulamasının Teknik, Çevresel ve Ekonomik İncelenmesi: Meram Tıp Fakültesi Hastanesi Örneği . EMO Bilimsel Dergi , 5 (10) , 9-14 . doi:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/26509/278950>
- Buyukzeren, R., Kahraman, A., Kaya, M.N., Dag, H.I., 2021. Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump. Gazi Univ. J. Sci. PART C Des. Technol. 9 4 , 739–748. doi:10.29109/gujsc.1002791 (Doktora tezinden yapılmıştır.)
- Buyukzeren, R., Kahraman, A., Kaya, M.N., Dag, H.I., 2022. Comparison of different solar collector configurations to assist an air source heat pump for supplying domestic hot water. Building Simulation. (Doktora tezinden yapılmıştır.) (Değerlendirme aşamasında)