



**AKSARAY İLİ LASTİK FABRİKASI SU KAYNAKLI
ISI POMPASI UYGULAMA VE ANALİZİ**

Halil İbrahim KAZICI

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Alperen TOZLU

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**AKSARAY İLİ LASTİK FABRİKASI SU KAYNAKLI ISI POMPASI UYGULAMA
VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil İbrahim KAZICI

Danışman: Doç. Dr. Alperen TOZLU

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Alperen TOZLU danışmanlığında, Halil İbrahim KAZICI tarafından hazırlanan “Aksaray İli Lastik Fabrikası Su Kaynaklı Isı Pompası Uygulama ve Analizi” başlıklı bu çalışma, 24.11.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Emrah ÖZAHİ

Üye : Doç. Dr. Alperen TOZLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALİM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Alperen TOZLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Aksaray İli Lastik Fabrikası Su Kaynaklı Isı Pompası Uygulama ve Analizi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.11.2025

Halil İbrahim KAZICI



ÖN SÖZ

Tez yazım sürecinde desteğini esirgemeyen hocam Doç. Dr. Alperen TOZLU'ya teşekkür ederim.

Enerji verimliliği ve proje danışmanlığı alanındaki çalışmalarıyla bu süreçte teknik bilgi ve deneyimlerini paylaşılarak katkı sunan Emar EVD firmasına ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımın her anında en büyük dayanağım olan canım babam Celal Kazici'ya, fedakârlığıyla ve sevgisiyle beni bugünlere taşıyan canım annem Sevgil Kazici'ya, varlıklarıyla güç veren değerli kardeşlerim Nurgül, Tuğba, Meryem, Halit, Mücahit ve Berat'a gönülden teşekkür ederim.

Bu süreçte beni destekleyen ve değerli varlığıyla yolumu aydınlatan Melek Durmuş'a da özel bir teşekkür borçluyum.

Ve tüm kalbimle...

Bu tezi, kıymetli annem Sevgil Kazici'ya ve

3 Ekim 2021 tarihinde aramızdan ayrılan kıymetli babam Celal Kazici'ya sevgi, rahmet ve derin bir özlemle ithaf ediyorum.

Halil İbrahim KAZICI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKSARAY İLİ LASTİK FABRİKASI SU KAYNAKLI ISI POMPASI UYGULAMA VE ANALİZİ

Halil İbrahim KAZICI

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alperen TOZLU

Bayburt-2025, Sayfa: 119

Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki bir ortama taşıyan, hem ısıtma hem de soğutma yapabilen yüksek verimli sistemlerdir. Enerji verimliliği, fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve karbon salımının düşürülmesi hedefleri doğrultusunda sanayi tesislerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu çalışma, Aksaray’da bulunan bir Lastik Sanayi ve Tic. A.Ş. tesisinde gerçekleştirilen enerji etütleri kapsamında, su kaynaklı ısı pompası (SKIP) uygulamasının teknik ve ekonomik analizini sunmaktadır. Çalışmadaki amaç enerji verimliliğini artırmak, doğal gaz tüketimini azaltmak ve doğaya salınan karbon salımını düşürmektir. SKIP sistemi kullanılarak soğutma kulelerinden atılan ısı geri kazanılarak proses ısıtma ihtiyacına yönlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde yıllık 6.788.251 kWh doğalgaz tasarrufuna karşılık 1.262.882 kWh elektrik tüketilmiş, net 475,18 TEP/yıl tasarruf ve 797,89 ton CO₂ salım azalımı sağlanmıştır. Ekonomik analizde yıllık 5,7 milyon TL tasarruf ve 2,41 yıl geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Yapılan uygulama sonucunda doğalgaz kullanımından kaynaklanan emisyon 1.588 ton CO₂-e, ısı pompası tüketiminden kaynaklanan emisyon ise 746 ton CO₂-e olarak gerçekleşmiştir. Elektrik tasarrufundan sağlanan ilave azaltım 45 ton CO₂-e seviyesindedir. Bu toplam etki, yıllık bazda yaklaşık 58.000 ağacın karbon tutumuna eşdeğer bir çevresel faydaya karşılık gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Isı Pompası, su kaynaklı ısı pompaları, SKIP, enerji verimliliği.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

AKSARAY PROVINCE TIRE FACTORY WATER SOURCE HEAT PUMP APPLICATION AND ANALYSIS

Halil İbrahim KAZİCİ

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Alperen TOZLU

Bayburt-2025, Pages: 119

Heat pumps are highly efficient systems that transfer heat from a low-temperature source to a high-temperature environment, capable of both heating and cooling. They are widely implemented in industrial facilities to achieve the goals of energy efficiency, reducing fossil fuel consumption, and reducing carbon emissions. This study presents the technical and economic analysis of a water source heat pump (SKIP) application within the scope of energy audits conducted at a Tire Industry and Trade Inc. facility in Aksaray. The study aims to increase energy efficiency, reduce natural gas consumption, and reduce carbon emissions. Using the SKIP system, heat removed from the cooling towers was recovered and directed to process heating needs. The data obtained in the study show that 1,262,882 kWh of electricity was consumed, corresponding to an annual natural gas savings of 6,788,251 kWh, resulting in a net savings of 475.18 TEP/year and a CO₂ emission reduction of 797.89 tons. The economic analysis calculated annual savings of 5.7 million TL and a payback period of 2.41 years. As a result of this implementation, emissions from natural gas consumption amounted to 1,588 tons of CO₂-e, while emissions from heat pump consumption amounted to 746 tons of CO₂-e. The additional reduction from electricity savings is 45 tons of CO₂-e. This total impact corresponds to an environmental benefit equivalent to the carbon sequestration of approximately 58,000 trees on an annual basis.

Keywords: Heat Pump, water source heat pumps, SKIP, energy efficiency.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XII
SİMGELER.....	XIII
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	2
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Varsayımlar	3
Terim ve Tanımları.....	3
BİRİNCİ BÖLÜM.....	4
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	4
1.1. LİTERETÜR ARAŞTIRMASI	5
1.2. ISI POMPASI.....	11
1.2.1. Isı Pompası ve Tarihsel Gelişim Süreci.....	12
1.2.2. Isı Pompası Çalışma Prensibi ve Elemanları.....	15
1.2.3. Isı Pompasının Temel Kavramları.....	21
1.2.3.1. COP (Energy Efficiency Ratio) veya ısıtma etkinlik katsayısı	21
1.2.3.2. SPF (Sezonsal Performans Faktörü).....	22
1.2.3.3. EER (Energy Efficiency Ratio)	22
1.2.4. Isı Pompası Çeşitleri.....	22
1.2.4.1. Hava kaynaklı ısı pompaları	23
1.2.4.2. Su kaynaklı ısı pompaları	24
1.2.4.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları.....	28
1.2.4.4. Hibrit sistemler	29
1.2.5. Isı Pompası Kullanım Alanları	36
1.2.5.1. Isı pompalarının faydaları.....	46
1.2.6. Dünyada Isı Pompası	49
1.2.6.1. Avrupa’da ısı pompası kullanımı	50
1.2.6.2. Türkiye’nin yeşil dönüşümdeki hedefleri.....	54
1.3. SOĞUTMA KULELERİ.....	58
1.3.1. Soğutma Kulelerinin Sınıflandırılması.....	58
1.3.1.1. Hava akış mekanizmasına göre sınıflandırma	58
1.3.1.2. Isı transfer mekanizmasına göre sınıflandırma.....	61
1.3.1.3. Kullanım alanına göre sınıflandırma	63

1.4. KAZANLAR	64
1.4.1. Sıcak Su Kazanları.....	66
1.4.2. Buhar Kazanları.....	68
İKİNCİ BÖLÜM	71
2. YÖNTEM.....	71
2.1. SİSTEM KURULUMUNUN AMACI VE KAPSAMI	71
2.2. VERİ TOPLAMA VE SİSTEM BİLEŞENLERİ.....	73
2.2.1. Sistemde Kullanılan Kazan, Isı Pompası ve Soğutma Kuleleri.....	73
2.2.1.1. Kazanlar.....	74
2.2.1.2. Isı pompası.....	78
2.2.1.3. Soğutma kulesi	86
2.2.1.4. Basıncılı hava sistemleri	90
2.2.1.5. Tesisin genel işleyişi ve enerji sistemleri	92
2.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN CİHAZLAR VE ALINAN ÖLÇÜMLER.....	94
2.4. ARAŞTIRMACININ ROLÜ.....	96
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	97
3. BULGULAR.....	97
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	109
Sonuç	109
Tartışma.....	111
Öneriler.....	111
KAYNAKÇA.....	112
ÖZ GEÇMİŞ	119

TABLÖLAR

Tablo 1: Temel Performans Göstergeleri	21
Tablo 2: Aksaray İli Yıllık Sıcaklık Tablosu.....	72
Tablo 3: Sıcak Su Kazanları Bilgileri.....	75
Tablo 4: Buhar Kazanları Bilgileri	76
Tablo 5: Sıcak Su Kazanları Baca Gazı Ölçüm Değerleri.....	77
Tablo 6: Buhar Kazanları Baca Gazı Ölçüm Değerleri	77
Tablo 7: Isı Pompası Özellikleri	80
Tablo 8: Isı Pompası Kazanç Hesabı.....	84
Tablo 9: Isı Pompası Uygulama Kapsamında Enerji Değerleri.....	85
Tablo 10: Elde Edilen Enerji Kazançları	85
Tablo 11: 2020 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Tablosu	97
Tablo 12: 2021 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Tablosu	98
Tablo 13: 2020 Yılı Elektrik Tüketim Tablosu	99
Tablo 14: 2021 Yılı Elektrik Tüketim Tablosu	99
Tablo 15: 2020 Yılı Buhar Doğalgaz Tüketimi.....	100
Tablo 16: 2021 Yılı Buhar Doğalgaz Tüketimi.....	100
Tablo 17: 2020 Yılı Sıcak Su Doğalgaz Tüketim Tablosu.....	101
Tablo 18: 2021 Yılı Sıcak Su Doğalgaz Tüketim Tablosu.....	101
Tablo 19: 2020 Yılı Toplam Enerji Tüketim Tablosu.....	102
Tablo 20: 2021 Yılı Toplam Enerji Tüketim Tablosu.....	102
Tablo 21: CO ₂ Salınım Hesabı.....	108

ŞEKİLLER

Şekil 1: Isı Pompası Çalışma Düzeni Şematik Gösterimi.....	12
Şekil 2: Isı Pompasının Enerji Dönüşüm Prensibi	14
Şekil 3: Isı Pompasının Çalışma Prensibi	15
Şekil 4: Isı Pompası Çalışma Prensibi ve Sistem Elemanları	16
Şekil 5: Soğutucu Akışkanlar ve Özellikleri.....	19
Şekil 6: Isı Pompası Performans Katsayısının (COP) Gösterimi.....	22
Şekil 7: Isı Pompa Kaynakları	23
Şekil 8: Hava Kaynaklı Isı Pompası Tesisat Örneği	23
Şekil 9: Yüzey Suyu Uygulaması	24
Şekil 10: Yeraltı Suyu Uygulaması.....	26
Şekil 11: Yatay Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası	28
Şekil 12: Dikey Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası	29
Şekil 13: Hibrit Sistem Örnek Resim.....	30
Şekil 14: Hava Kaynaklı Isı Pompası ve İç Ünite Sistem Bileşenleri	32
Şekil 15: Isı Pompası Ve Isı Depolama Sistemine Ait Hidrolik Devre Şeması.....	32
Şekil 16: Kombi İle Kullanılan Hibrit Isı Pompası Sistemi Şeması	33
Şekil 17: Kaskad Bağlantılı Isı Pompası ve Harici İlave Isıtıcı Şeması	34
Şekil 18: Isı Pompası Kullanım Alanları	36
Şekil 19: Bursa İli Örnek Proje	37
Şekil 20: Foleya Mountain Resort Otelinde Uygulanan Havadan Suya Isı Pompası Sistemi	38
Şekil 21: Terracity Alışveriş Merkezinde Uygulanan Yer Altı Suyu Kaynaklı Isı Pompası Sistemi Şeması	39
Şekil 22: Ankara Yüksek Hızlı Tren Garı'nda Uygulanan Su Kaynaklı Isı Pompası ve Free-Cooling Sistemi	40
Şekil 23: Düzce Çiftlik Projesinde Uygulanan Toprak Kaynaklı Altı Borulu Sudan Suya Isı Pompası	42
Şekil 24: Ankara Karacaoğlan Villa Projesinde Uygulanan Toprak Kaynaklı Isı Pompası ve Pv-Hibrit.....	43
Şekil 25: Ankara Hibrit Isıtmaya Sahip Konut Binası	44
Şekil 26: Ankara Konut Binası Hibrit Isıtma Soğutma Sistemi.....	45
Şekil 27: Isı Pompası Kapasitesi ile Isıtma İhtiyacının Dış Ortam Sıcaklığına Göre Değişimi	47
Şekil 28: Isı Pompası Enerji Gereksinimi ve Yardımcı Isıtma İhtiyacının Yıl İçindeki Dağılımı.....	48
Şekil 29: Avrupa Ülkelerinin 2014-2024 Isı Pompası Satış Oranları	51
Şekil 30: 2023 ve 2024 Yılları Arasında Avrupa Ülkelerinde Isı Pompası Satışlarının Karşılaştırması.....	52
Şekil 31: Avrupa'da Isı Pompası Stoklarının Güncel Büyümesi ve 2030 Hedefi Karşılaştırması.....	53
Şekil 32: Türkiye Isı Potansiyeli Haritası	56
Şekil 33: Türkiyede 2015-2024 Yılları Arasında Satılan Isı Pompası Sayısı	57
Şekil 34: Mekanik Soğutma Kulesi	59

Şekil 35: Doğal Çekişli (Hiperbolik) Soğutma Kulesinin Çalışma Prensibi	60
Şekil 36: Kuru Soğutma Kulesinin Çalışma Prensibi	62
Şekil 37: Kazan Sisteminde Enerji Akış Şeması	65
Şekil 38: Sıcak Su Kazanının Yapısı	67
Şekil 39: Buhar Su Kazanının Yapısı	69
Şekil 40: Türkiye Hava Kaynaklı Isı Pompası COP Değerleri	72
Şekil 41: Sıcak Su ve Buhar Kazanları	74
Şekil 42: Sıcak Su Sistem Şeması.....	75
Şekil 43: Buhar Sistem Şeması	76
Şekil 44: Sıcak Su ve Buhar Kazanları Baca Gazı Ölçümleri	77
Şekil 45: Uygulama Sonrası Sistem Şeması	78
Şekil 46: Sistemde Kullanılan Isı Pompası Örneği.....	79
Şekil 47: Tesiste Bulunan Soğutma Kulesi ve Bağlantı	86
Şekil 48: Kule-1 Sistemine Ait Akış Şeması	87
Şekil 49: Kule-2 Sistemine Ait Akış Şeması	87
Şekil 50: Konfor Chiller.....	88
Şekil 51: Konfor Chiller Sistem Şeması	88
Şekil 52: Tesiste Kullanılan Soğutma Sistemine Ait Akış Diyagramı	89
Şekil 53: Tesisteki Basınçlı Hava Sistemi	91
Şekil 54: Kompresör Sisteminin Genel Yerleşimi	92
Şekil 55: Kule Sistem Bağlantı Şeması.....	92
Şekil 56: Mixer Ünitesi Örnek Resim.....	93
Şekil 57: Baca Gazı Ölçüm Cihazı Örnek Görsel.....	94
Şekil 58: Ultraonik Debimetre Cihazı Örnek Görsel	95
Şekil 59: Pitot Tüp Örnek Cihaz Görseli	95
Şekil 60: Elektrik Enerjisi Analizörü Örnek Cihaz Görseli	96
Şekil 61: 2020 Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılımı.....	97
Şekil 62: 2021 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Oranları	98
Şekil 63: 2020-2021 Yılı Aylık Enerji Tüketim Grafiği.....	103
Şekil 64: 2020- 2021 Yılı Aylara Göre Üretim/Enerji Tüketim Dağılım Grafiği	104
Şekil 65: Aylara Göre Isı Pompası Enerji Tüketimi, Doğalgaz ve Elektrik Kazançları	105
Şekil 66: Isı Pompası Yıllık Enerji Tüketimi ve Kazanç Dağılımı.....	106
Şekil 67: Isı Pompası Sistemine Ait Yıllık Mali Kazanç Dağılımı.....	107

KISALTMALAR

COP	: Coefficient of Performance (Performans Katsayısı)
EER	: Energy Efficiency Ratio (Enerji Verimlilik Oranı)
SPF	: Seasonal Performance Factor (Sezonsal Performans Faktörü)
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
CO₂	: Karbondioksit
SKIP	: Su Kaynaklı Isı Pompası
WSHP	: Water Source Heat Pump
CHP	: Combined Heat and Power (Kojenerasyon)
kW	: Kilowatt (Güç Birimi)
kWh	: Kilowatt-saat (Enerji Birimi)
₺	: Türk Lirası (Mali Kazanç)
m³	: Metreküp (Hacim Birimi)
m²	: Metrekare (Alan Birimi)
h	: Saat (Zaman Birimi)
ODP	: Ozone Depletion Potential (Ozon Tüketme Potansiyeli)
GWP	: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
R32, R290, R744, R717	: Soğutucu Akışkan Kodları
IEK / SEK / MEK / KMPF	: Isı Pompası Performans Katsayıları
ASHP	: Hava Kaynaklı Isı Pompası
CFC	: Kloroflorokarbonlar
HCFC	: Hidrokloroflorokarbonlar
HFO	: Hidroflorokarbonlar
HFC	: Hidrofloroolefinler
USGBC	: Amerikan Yeşil Binalar Derneği
EWT	: Entering Water Temperature (Giriş Suyu Sıcaklığı)
CCHP	Combined Cooling, Heating and Power (Birleşik Soğutma-Isıtma - Elektrik Üretimi)
CO₂-e/kWh	: Carbon Dioxide Equivalent per Kilowatt-hour (Kilovat-saat başına karbondioksit eşdeğeri emisyon)

SİMGELER

Q	: Isı miktarı (kJ veya kWh)
P	: Güç (kW)
ΔT	: Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
η	: Verim (%)
p	: Basınç (bar veya Pa)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$ veya K)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)



GİRİŞ

Enerji maliyetlerinin sürekli arttığı ve küresel iklim değişikliğinin etkilerinin hissedilir derecede arttığı günümüzde, sanayi tesislerinde enerji verimliliği çalışmaları ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin temel unsurlarından biri hâline gelmiştir. Sanayileşmenin hızla gelişmesi, enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilir üretim anlayışını ön plana çıkarmaktadır. Enerji maliyetlerinin giderek arttığı ve iklim değişikliği ile mücadele kapsamında karbon salımının azaltılmasının zorunlu hâle geldiği günümüzde, endüstriyel işletmelerin enerji yönetim sistemlerini etkin biçimde uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Yüksek enerji tüketimine sahip lastik üretim tesisleri, gerek üretim proseslerinin gerektirdiği sürekli ısıtma ve soğutma ihtiyacı gerekse kullanılan motor, basınçlı hava ve soğutma sistemleri nedeniyle enerji verimliliği potansiyeli yüksek olan işletmeler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, mevcut sistemlerin performans analizleri ile verimliliği artıracak teknolojik çözümlerin uygulanması hem işletme maliyetlerini düşürmekte hem de sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır.

Bu çalışmada, Aksaray ilinde faaliyet gösteren bir lastik üretim tesisinde mevcut enerji tüketim profili incelenmiş, verimlilik artırıcı önlemler belirlenmiş ve özellikle su kaynaklı ısı pompası uygulamasının teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Enerji etüt raporları, saha ölçümleri ve sistem performans verileri kullanılarak, mevcut durum analizi ve iyileştirme potansiyelleri ortaya konmuştur.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Araştırma, yüksek enerji yoğunluğuna sahip lastik üretim tesislerinde enerji tasarrufu sağlamak amacıyla su kaynaklı ısı pompası teknolojisinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Mevcut durumda tesiste elektrik ve doğalgaz tüketiminin yüksek olması, özellikle ısıtma ve soğutma süreçlerinin yıl boyunca paralel olarak çalışması, önemli miktarda atık ısıнын boşa gitmesine neden olmaktadır. Bu durum hem enerji maliyetlerini artırmakta hem de sera gazı emisyonlarını yükseltmektedir. Dolayısıyla, enerji verimliliği sağlayacak ve çevresel etkileri azaltacak alternatif sistemlerin uygulanması gerekliliği bu çalışmanın temel problemini oluşturmaktadır. Enerji verimliliği, sürdürülebilir kalkınmanın temel hedeflerinden biridir. Fosil yakıtların neden olduğu karbon salımı ve iklim değişikliği sorunları, yenilenebilir enerji teknolojilerini ön plana çıkarmaktadır. Isı pompaları, yüksek COP (Coefficient of Performance) değerleri sayesinde aynı miktardaki enerjiyi daha düşük maliyetle üretebilmekte ve çevresel açıdan daha temiz bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmanın önemi, gerçek saha verileri kullanılarak (aylık debi, sıcaklık farkı, kapasite, tüketim ve kazanç değerleri) ısı pompası sistemlerinin ekonomik ve çevresel katkısının somut olarak ortaya konulmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, hem akademik alanda hem de sanayi uygulamalarında yol gösterici bir kaynak niteliği taşıyacaktır.

Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın genel amacı, ısı pompası uygulamalarının enerji tasarrufu ve maliyet avantajlarını ortaya koymaktır. Bu genel amaca ulaşmak için şu alt amaçlar belirlenmiştir:

Isı pompasının aylık bazda soğutma ve ısıtma kapasitelerinin hesaplanması,

Elektrik tüketimi ile sağlanan enerji kazancının karşılaştırılması,

Doğalgaz tüketimine göre sağlanan maliyet avantajının ortaya konulması,

Isı pompası kullanımının toplam mali kazanca etkisinin analiz edilmesi.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Enerji verimliliği, sürdürülebilir kalkınmanın temel hedeflerinden biridir. Fosil yakıtların neden olduğu karbon salımı ve iklim değişikliği sorunları, yenilenebilir enerji teknolojilerini ön plana çıkarmaktadır. Isı pompaları, yüksek COP (Coefficient of Performance) değerleri sayesinde aynı miktardaki enerjiyi daha düşük maliyetle üretebilmekte ve çevresel açıdan daha temiz bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmanın önemi, gerçek saha verileri kullanılarak (aylık debi, sıcaklık farkı, kapasite, tüketim ve kazanç değerleri) ısı pompası sistemlerinin ekonomik ve çevresel katkısının somut olarak ortaya konulmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, hem akademik alanda hem de sanayi uygulamalarında yol gösterici bir kaynak niteliği taşıyacaktır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu araştırma şu sınırlılıklar çerçevesinde yürütülmüştür: Hesaplamalar yalnızca ilgili tesisin verileri üzerinden yapılmıştır. Veriler bir yıllık (Ağustos–Temmuz) dönemini kapsamaktadır. Isı pompasının performansı ortam koşullarına bağlı olup farklı coğrafi bölgelerde farklı sonuçlar doğurabilir. Çalışmada yalnızca enerji ve mali kazanç boyutu ele alınmış, çevresel etkiler (karbon salımı azaltımı vb.) detaylı incelenmemiştir.

Varsayımlar

- Mevcut tesis altyapısının ısı pompası entegrasyonuna uygun olduğu,
- Isı pompası sisteminin önerilen kapasitede kesintisiz çalışabileceği,
- Enerji birim fiyatlarının analiz süresince sabit kaldığı varsayılmıştır.
- Tabloya girilen debi, sıcaklık farkı ve çalışma saati verileri doğru ve güvenilir kaynaklardan elde edilmiştir.
- Elektrik ve doğalgaz birim fiyatlarının sabit kabul edildiği varsayılmıştır.
- Isı pompası sisteminin bakımı ve işletmesi düzenli yapılmakta ve performans düşüklüğüne neden olacak ek faktörler bulunmamaktadır.

Terim ve Tanımları

- Isı Pompası: Düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan aldığı enerjiyi yüksek sıcaklıktaki ortama taşıyarak hem ısıtma hem de soğutma yapabilen cihazdır.
- COP (Coefficient of Performance): Isı pompasının verimlilik katsayısıdır.
- Enerji Kazancı (kWh): Isı pompasının doğalgaz veya elektrik yerine sağladığı enerji miktarıdır.
- Mali Kazanç (₺): Enerji kazancının parasal karşılığıdır.
- Soğutma/Isıtma Kapasitesi (kW): Isı pompasının belirli koşullar altında sağladığı ısıtma veya soğutma gücü.
- Çalışma Saati (h): Isı pompasının belirli bir dönemde aktif olarak çalıştığı süre.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Türkiye’de artan nüfus, şehirleşme ve sanayileşmeye paralel olarak enerji talebi her geçen gün yükselmektedir. Ancak mevcut enerji kaynakları bu ihtiyacı karşılamada yetersiz kalmakta ve ülkemiz enerji gereksiniminin önemli bir bölümü dışa bağımlı olarak karşılanmaktadır. Bu durum, hem ekonomik açıdan hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleri bakımından enerjinin verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir.

Enerji verimliliği, aynı üretim miktarını daha az enerjiyle gerçekleştirmek veya mevcut enerji tüketimini azaltırken üretim kalitesini korumak anlamına gelir. Günümüzde artan enerji maliyetleri, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel kaygılar nedeniyle enerji verimliliği kavramı, sanayi tesislerinde önemli bir tasarruf ve sürdürülebilirlik unsuru haline gelmiştir.

Endüstriyel tesislerde özellikle ısıtma, soğutma ve proses işlemlerinde yüksek miktarda enerji tüketilmektedir. Bu nedenle enerjinin etkin kullanımı, işletme maliyetlerinin düşürülmesinde ve çevresel etkilerin azaltılmasında kritik bir rol oynar. Enerji geri kazanım sistemleri, kayıp ısıyı yeniden değerlendirerek sistem verimini artırmakta ve enerji maliyetlerinin kısa sürede geri kazanılmasına olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Aksaray İli’nde bulunan bir lastik fabrikasında soğutma kulesi, kazan ve su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin hibrit olarak kullanılması durumunda elde edilebilecek enerji verimliliği ve ekonomik kazanç analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, mevcut kazan sistemine entegre edilen ısı pompası uygulamasıyla enerji tüketiminin azaltılması ve sistem performansının iyileştirilmesidir. Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan aldıkları ısıyı yüksek sıcaklıktaki ortama aktarabilen, hem ısıtma hem de soğutma amacıyla kullanılan yüksek verimli termodinamik sistemlerdir. Bu sistemler, sanayi tesislerinde enerji geri kazanımı ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Hibrit sistem yaklaşımında, soğutma kulesi proses atık ısını ortamdan uzaklaştırırken ısı pompası bu enerjiyi geri kazanarak ısıtma veya sıcak su üretiminde değerlendirir. Kazan ise yalnızca yüksek sıcaklık gereksiniminin bulunduğu durumlarda devreye girer. Böylece sistemin genel enerji verimi artmakta, yakıt tüketimi azalmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, hibrit sistem uygulamasının enerji maliyetlerini düşürdüğü, fosil yakıt kullanımını azalttığı ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde sınırladığı belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, sanayi tesislerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımına ve sürdürülebilir enerji yönetimi stratejilerine katkı sağlamaktadır.

1.1. LİTERETÜR ARAŞTIRMASI

Gaur vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2000–2020 yılları arasındaki araştırmalar sistematik biçimde incelenmiş ve ısı pompalarının karbonsuz bir enerji geleceğindeki rolü kapsamlı olarak ele alınmıştır. İnceleme; ısı pompası teknolojileri ve kullanım alanları, yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerde esneklik potansiyeli, modelleme yaklaşımları ve yaygınlaşma önündeki engeller olmak üzere dört temel eksen üzerinden yürütülmüştür. Bulgular, ısı pompalarının enerji verimliliği ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli açısından merkezi bir role sahip olduğunu, ancak bu etkinin kullanılan teknoloji türü, coğrafi koşullar ve elektrik üretim karmasına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, atık ısının değerlendirilmesi, bölgesel ısıtma ağları ve yenilenebilir enerji entegrasyonu sayesinde düşük maliyetli ve çevre dostu çözümler sundukları vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri, mevzuat belirsizlikleri ve altyapısal kısıtlar, yaygınlaşma hızını sınırlayan temel engeller olarak ortaya konmuştur. Bu kapsamlı inceleme, hem politika yapıcılar hem de araştırmacılar için gelecek çalışmaların yönünü belirleyici nitelikte önemli bir literatür katkısı sağlamaktadır.

Ağ ve Kızılkın (2023) çalışmasında, PVT entegreli ve CO₂ akışkanlı hibrit bir ısı pompası sistemi tasarlanmış ve bu sistem ile bir konutun ısıtma ve elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasına yönelik teorik bir inceleme yapılmıştır. Çalışmada öncelikle evin ısıtma ihtiyacı belirlenmiş, ardından PVT'nin termal ve elektriksel analizleri gerçekleştirilmiş ve son olarak ısı pompasının termodinamik analizi yapılmıştır. PVT entegreli CO₂ akışkanlı hibrit bir ısı pompası sistemi tasarlanmış ve farklı akışkanlarla performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Çalışmada tasarlanan evin ısıtma ihtiyacı TS 825 standardına göre belirlenmiş, PVT entegrasyonunun COP değerini %22 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, CO₂ akışkanının performansı, ticari olarak kullanılan R290 ve R32 akışkanları ile kıyaslanmış; en verimli akışkanın R290 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan analizler sonucunda CO₂ akışkanlı PVT entegreli ısı pompası sisteminin çevreci özellikler sunsa da R290 ve R32'ye göre daha düşük verimli olduğu belirlenmiştir.

Mechmet (2023) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde, yapılarda ısı pompası kullanımının enerji etkinliği bağlamında incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Edirne'deki örnek bir yapı üzerinden ısı pompasının enerji tüketimine etkisi değerlendirilmiş, ayrıca aynı proje Türkiye'nin dört farklı derece-gün bölgesine uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Isı pompası sistemleri doğal gazlı kombi ve kömürlü sistemlerle karşılaştırılmış, avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Ayrıca ısı pompalarının güneş panelleriyle entegrasyonu da

incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, ısı pompaları yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını desteklemekte, enerji verimliliğini artırmakta ve fosil yakıtlara kıyasla çevresel etkileri azaltmaktadır.

Goričanec vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, baca gazlarında bulunan düşük sıcaklıklı atık ısının geri kazanılarak yüksek sıcaklıklı ısı pompalarıyla değerlendirilmesine yönelik yenilikçi bir sistem geliştirilmiştir. Araştırmada, binalarda ve endüstriyel tesislerde yüksek sıcaklıkta ısıtma ihtiyacı bulunan sistemlerde, mevcut sıcak su kazanlarının baca gazlarından elde edilen düşük sıcaklıklı fazla ısının kullanımı üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada, baca gazı hattına yerleştirilen bir yoğuşturucu ısı eşanjörü (kondenser) yardımıyla baca gazındaki su buharının yoğuşturulması ve bu süreçte açığa çıkan ısının su veya su-glikol karışımına aktarılması sağlanmıştır. Bu ön ısıtılmış akışkan, ardından yüksek sıcaklıklı ısı pompasının kondenserine yönlendirilmiş ve burada sıcak su kazanına geri gönderilmeden önce ek ısı kazanmıştır. Sistem performansı, Aspen Plus yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında simüle edilmiş; ayrıca, baca gazı atık ısısının kullanımıyla elde edilen ekonomik kazanç analiz edilmiştir. Sonuçlar, doğal gazla çalışan sıcak su kazanlarının baca gazı sıcaklığının 25 °C'ye kadar düşürülmesiyle birincil enerji verimliliğinin %17,6 oranında artırılabilceğini göstermiştir (verim %90,6'dan %108,2'ye yükselmiştir). Araştırmada ayrıca, seri bağlı dört yüksek sıcaklıklı ısı pompası kullanılarak baca gazlarının yaklaşık 5 °C'ye kadar ilave soğutulmasının mümkün olduğu, bu sayede sistemin hem enerji verimliliğinin hem de ekonomik performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceği belirtilmiştir. Yatırım maliyetlerinin düşük ve geri dönüş süresinin kısa olması, bu yöntemi endüstriyel uygulamalar için uygulanabilir bir çözüm haline getirmektedir.

Li vd. (2024) hava kaynaklı ısı pompası sistemine farklı güneş enerjisi destek ünitelerinin entegrasyonunu incelemiştir. Çalışmada, vakum tüplü güneş enerjili su ısıtıcısı (SETWH) ile mikro ısı borulu fotovoltaiik/termal (MHP-PV/T) sistemlerin, ısı pompası ile birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, MHP-PV/T-ısı pompası sisteminin enerji verimliliği, güneş katkısı ve birincil enerji tasarrufu açısından SETWH-ısı pompası sistemine göre daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca bu sistemin geri ödeme süresinin daha kısa ve karbon salımının daha düşük olduğu rapor edilmiştir.

Xu vd. (2022) lüks bir yolcu gemisindeki yüzme havuzunun enerji tüketimini azaltmak amacıyla, hava kaynaklı ısı pompası su ısıtıcıları ile egzoz gazı kazanını birleştiren hibrit bir sistemin fizibilite çalışmasını gerçekleştirmiştir. TRNSYS ile yapılan simülasyon sonuçları,

önerilen sistemin mevcut düzene göre enerji tüketimini %77,1, işletme maliyetlerini ise %66,9 oranında azalttığını göstermiştir. Bu bulgular, ısı pompası ve kazan entegrasyonunun denizcilik uygulamalarında yüksek enerji verimliliği ve ekonomik avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Doğan (2020) yüksek lisans tezinde, kanalizasyon atık su kaynaklı ısı pompası sisteminin teorik analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada atık su sıcaklığı ve debisinin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiş, MATLAB ortamında oluşturulan matematiksel model aracılığıyla simülasyon yapılmıştır. Bulgulara göre, atık su sıcaklığındaki değişimler performans katsayısını 2,56'dan 4,51'e çıkarırken, debi değişiminde bu değer 2,89'dan 4,27'ye yükselmiştir. Sonuçlar, atık su sıcaklığının sistem performansına debiden daha fazla etki ettiğini göstermiştir. Ayrıca atık suyun yıl boyunca sıcaklık ve debi açısından büyük değişiklik göstermemesi nedeniyle, bu kaynağın ısı pompası sistemleri için sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji kaynağı olabileceği belirtilmiştir.

Pensini vd. (2014) yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranlı entegrasyonunda üretim ile talep arasında ciddi zaman uyumsuzlukları meydana gelmekte ve özellikle rüzgâr enerjisi kış aylarında talebin üzerinde elektrik üreterek sistemde fazla elektrik oluşmasına neden olmaktadır. Bu konu ABD'nin kuzeydoğusunda yer alan PJM Interconnection bölgesinde fazla elektriğin ısıtma amaçlı kullanımını incelemiştir. Çalışmada iki farklı sistem modeli karşılaştırılmıştır: ısı pompası temelli bölgesel ısıtma (HPDH) ile termal enerji depolama (TES) ve elektrikli dirençli ısıtma (R) ile yüksek sıcaklıklı termal depolama (HTS). Her iki senaryoda da doğalgaz kazanı yedekleme ünitesi olarak kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, ısı pompası temelli sistemlerin hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. HPDH sistemlerinde ısıtma maliyetlerinin geleneksel doğalgazlı sistemlere göre daha düşük veya benzer seviyelerde olduğu, dirençli ısıtmada ise maliyetlerin daha yüksek kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca doğalgaz tüketiminin %97'ye kadar azaltılabileceği ve bu sayede CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde düşürülebileceği belirtilmiştir. Çalışmada termal enerji depolamanın kritik bir rol üstlendiği, depolama kapasitesi arttıkça doğalgaz bağımlılığının daha da azaldığı vurgulanmaktadır. Bu bulgular, yüksek yenilenebilir enerji oranına sahip senaryolarda fazla elektriğin ısıtma amaçlı kullanımının teknik olarak uygulanabilir ve ekonomik olarak rekabetçi bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Vidinlioğlu ve Cimşit (2023) çalışmalarında su kaynaklı ısı pompası sisteminin performansını inceleyerek uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. R-410A soğutucu akışkan ile modellenen sistem; ısı pompası devresi, su altı ısı değiştirici devresi ve fancoil devresinden oluşmaktadır. Yaz ve kış koşulları için farklı kondenser ve evaporatör sıcaklıklarında enerji ve

ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Su altı ısı değiştiriciye giren suyun sıcaklıkları kış için 14,1/10 °C, yaz için ise 17/27 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca fancoil devresinde dolaşan suyun sıcaklık aralıkları ısıtma modunda 50/40 °C, soğutma modunda ise 7/12 °C olarak çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kış koşullarında kondenser sıcaklığının artması COP değerinde azalmaya ve toplam ekserji yıkımında artışa yol açmaktadır. Yaz koşullarında ise evaporatör sıcaklığının azalması COP değerinin düşmesine ve ekserji yıkımının artmasına neden olmaktadır. Çalışma, su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin enerji ve ekserji temelli performans analizlerinin mühendislik uygulamaları için önemli veriler sunduğunu ortaya koymaktadır.

Özçelik (2023) tarafından yapılan çalışmada, Denizli’de bulunan üç katlı bir villanın ısı pompası ile ısıtılması incelenmiştir. TS825 standartlarına uygun olarak tasarlanan binada, “Daikin Stand By Me” programı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısı pompası sistemi, doğal gazlı ve sıvı yakıtlı sistemlerle verimlilik, ekonomi ve CO₂ emisyonları açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ısı pompası kullanımında CO₂ emisyonlarının doğal gaz sistemine göre 2,28 kat, sıvı yakıt sistemine göre ise 3,04 kat daha düşük olduğunu göstermiştir. Isı pompasının SCOP değeri 4,46 olarak hesaplanmıştır. Ancak elektrik fiyatlarının yüksekliği nedeniyle ekonomik açıdan dezavantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Çokgez Kuş ve Çomaklı (2015) yaptıkları çalışmada ısı kaynağı olarak hava ve suyun kullanıldığı, hava-hava, hava-su, su-su ve su-hava olmak üzere dört farklı şekilde çalışabilen ısı pompasının verim değişimlerini parametrik olarak inceleyerek aynı kapasiteye sahip elektrikli ısıtıcı sistem ile ekonomik yönden karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan hesaplamalara göre en yüksek yıllık elektrik maliyeti havadan suya ısı pompası sisteminde, en düşük maliyetin sudan havaya ısı pompası sisteminde olduğu belirlenmiştir. Yüksek buharlaştırıcı kaynak akışkan sıcaklığına sahip sistemlerin daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır. Isı pompası sisteminin dört farklı çalışma şekli içinde elektrik tüketiminin, elektrikli ısıtıcıya göre en az üç kat daha az olduğu saptanmıştır.

Zlateva ve Yordanov (2019) Varna’daki bir idari binada kullanılan hava-su tip ısı pompası sisteminin kış dönemindeki performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı sıcaklık aralıklarında elde edilen sonuçlar, sistemin ortalama COP değerlerinin 2,8 seviyelerinde olduğunu ve Karadeniz iklim bölgesinde ısıtma modunda verimli çalıştığını göstermiştir. Ayrıca yapılan ekonomik analizler, kış sezonunda elektrik tüketim maliyetlerinin oldukça düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçların, yeni hava-su ısı pompası

sistemlerinin tasarımında ve enerji verimli binaların geliştirilmesinde kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Doğan vd. (2016) çalışmalarında Kırıkkale ilinde bulunan olimpiik yüzme havuz suyunun ısıtılmasında doğalgazlı kazan ve toprak kaynaklı ısı pompasının birlikte kullanımını araştırmışlardır. Isıtma ihtiyacının karşılanmasında hibrit toprak kaynaklı ısı pompasının kullanılması durumunda sistemin kendini bir yıldan kısa sürede amorti ettiğini ve güneş enerjili ısıtma sistemi kullanılması durumunda üç yılda kendini amorti ettiğini belirlemişlerdir.

Sciacovelli vd. (2014) kentsel alanlarda açık devre yeraltı suyu ısı pompalarının enerji performansını ve çevresel etkilerini çok ölçekli bir modelleme yaklaşımıyla incelemiştir. İtalya'nın Torino kentinde planlanan bir gökdelen örneği üzerinden yapılan çalışmada, yeraltı suyundan ısı çekilip geri verilmesiyle oluşan ısı bulutların (thermal plume) zamanla yayılımı ve bunun diğer ısı pompalarının performansına etkisi değerlendirilmiştir. Geliştirilen model, kuyular çevresinde ayrıntılı çözüm sağlayan 3 boyutlu CFD modeli ile uzak alanlarda ısı bozulmaları analiz eden ağ modelini birleştirerek hem geniş alan hem de uzun süreli simülasyonları düşük hesaplama maliyetiyle mümkün kılmıştır. Bulgular, yeraltı suyu akışında taşınımın (advection) ısı transferinde baskın mekanizma olduğunu göstermiştir. Sabit debili işletmede daha şiddetli sıcaklık bozulmaları meydana gelirken, değişken debili işletmede ısı bulut daha geniş alana yayılmış fakat bozulma daha sınırlı kalmıştır. Üç yıllık simülasyonlar sonucunda ısı bulutun 2 km'den fazla yayılarak Po Nehri'ne ulaşabileceği ve bu durumun komşu sistemlerin COP değerlerini %10-20 oranında azaltabileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak çalışma, kentsel alanlarda yeraltı suyu kaynaklı ısı pompalarının çevresel etkilerinin ve sistemler arası etkileşimlerin tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Han vd. (2022) düşük su sıcaklıklarında performans kaybı yaşayan su kaynaklı ısı pompaları (WSHP) için bir çözüm olarak güneş destekli ham su kaynaklı ısı pompası (SA-RWSHP) sistemini incelemiştir. TRNSYS yazılımı ile yapılan simülasyonlarda, güneş kollektörleri kullanılarak giriş suyu sıcaklığının (EWT) artırılmasıyla, ısıtma döneminde WSHP'nin performans katsayısının (COP_{hp}) iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Optimum tasarım parametreleri belirlendiğinde, SA-RWSHP'nin ısıtma sürecinde ortalama COP_{hp} değerinin geleneksel RWSHP'ye kıyasla %12,7 daha yüksek olduğu, yıllık toplam sistem COP (COP_{sys}) değerinin ise yaklaşık %18 arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, sistemin ömür boyu maliyetinin (LCC) %7 daha düşük olduğu ve geri ödeme süresinin 13,8 yıl olduğu belirtilmiştir. Çalışma, düşük sıcaklıklarda WSHP performansındaki azalmayı önlemek için güneş destekli hibrit çözümlerin enerji verimliliği ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Liu vd. (2017) Şanghay'daki bir enerji istasyonunda kullanılan nehir suyu kaynaklı ısı pompası (RWSHP) sistemini incelemiş ve sistemin mevsimsel performansını değerlendirmiştir. Çalışma, nehir suyu sıcaklığı ile dış hava sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Isıtma modunda, ünitelerin COP değeri 7,4 iken sistem COP değeri 5,2; soğutma modunda ise ünite COP değeri 6,5 iken sistem COP değeri 2,6 olarak bulunmuştur. Ayrıca, enerji tüketiminin büyük kısmının özellikle nehir suyu alma pompalarından kaynaklandığı belirtilmiş ve gelecekte optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Sungur (2022) Ankara'da bulunan Atakule Alışveriş Merkezi'nde kullanılan iklimlendirme sistemlerini incelemiş ve termodinamik ile ekonomik açıdan değerlendirmiştir. Çalışmada hâlihazırda kullanılan su kaynaklı ısı pompasının daha verimli çalıştırılması için buzda enerji depolama, evaporatif soğutma ve atık su ısısı geri kazanımı yöntemleri araştırılmıştır. Analizler sonucunda, buzda enerji depolamanın sistem verimini %17 artırdığı, elektrik maliyetlerini %29,4 düşürdüğü ve amortisman süresinin 4,2 yıl olduğu; evaporatif soğutmanın elektrik tüketiminde %6,8 azalma sağladığı; her iki sistemin birlikte kullanımında elektrik maliyetlerinin %36,2 azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, lavabo giderlerinden atık ısının geri kazanımıyla yıllık 28 bin TL tasarruf ve doğalgaz tüketiminde %40 azalma elde edildiği, bu sistemin amortisman süresinin ise 1,86 yıl olduğu ortaya konmuştur.

Si vd. (2015) karmaşık bir nehir suyu kaynaklı ısı pompası (WSHP) uygulamasını içeren bölgesel enerji sistemini incelemiştir. Çalışmada, sistemin uygulanabilirliği açısından hidrolik ve su kalitesi koşulları analiz edilmiştir. Sonuçlar, soğutma sezonunda ortalama su sıcaklığının 23,5 °C, ısıtma sezonunda ise 13,2 °C olduğunu ve bu değerlerin WSHP çalışması için uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, nehirdeki su debisinin sistem ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde olduğu, kimyasal parametrelerin (pH, Cl⁻, SO₄²⁻, toplam sertlik, toplam demir) cihaz gereksinimlerini sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, doğrudan kullanılan nehir suyundaki sediment yoğunluğunun cihaz için uygun olmadığı, bu nedenle çok kademeli filtreleme ve yüksek verimli kum ayırıcı ekipmanlarının gerekli olduğu vurgulanmıştır. Çalışma, nehir suyu kaynaklı ısı pompası ve birleşik soğutma-ısıtma-güç (CCHP) sistemlerinin kentsel alanlarda düşük karbonlu ve enerji verimli çözümler olarak uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Zhao vd. (2018) su kaynaklı ısı pompası su ısıtıcısı (WSHPWH) sisteminin deneysel performansını incelemiştir. Çalışmada, döngüsel ısıtma modunda kurulan prototip ile farklı buharlaştırıcı su akış hızlarının sistem verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, 50 litre suyun 28 °C'den 57 °C'ye 64 dakika içinde ısıtılabilirdiği, ancak su sıcaklığının 55 °C'nin üzerine çıkmasıyla kompresör deşarj basıncının kritik değerlere

yaklaştığı ve sistem kararsızlığının oluştuğu rapor edilmiştir. Ayrıca, COP değerinin artan su sıcaklığıyla düştüğü ve optimum çalışma koşullarının yaklaşık 8,7 L/dak buharlaştırıcı su akışında elde edildiği belirtilmiştir. Çalışmada kondenserin en yüksek ekserji kaybına sahip olduğu, bu nedenle sistemin enerji kullanım verimliliğini artırmak için kondenser kayıplarının azaltılmasının kritik olduğu vurgulanmıştır.

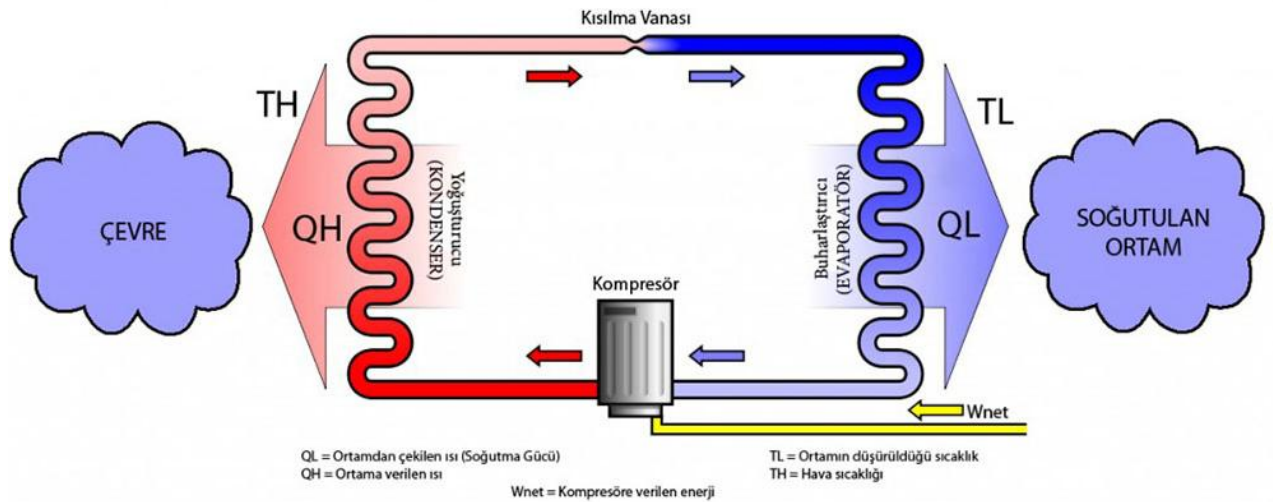
Guo ve Shan (2022) su kaynaklı ısı pompalarında görülen pompa sıkışması problemlerini incelemiştir. Çalışmada, sıkışmanın temel nedeninin pompa mekanik salmastrasındaki dinamik ve statik halkaların bağlanması olduğu belirtilmiştir. Kötü su kalitesi ile birlikte sudaki kalsiyum ve magnezyum karbonat birikimlerinin uzun süreli duruşlarda halkalar arasına girerek aşınmaya, yüzey difüzyonuna ve yapışmaya neden olduğu rapor edilmiştir. Bu durum, motorun kalkış torkunun aşılmasına ve pompanın çalışamamasına yol açmaktadır. Ayrıca, dinamik ve statik halkalar arasındaki montaj boşluğunun büyüklüğünün de sıkışma problemlerini artırdığı vurgulanmıştır. Çalışma, bu tür arızaların önlenmesi için su kalitesinin iyileştirilmesi ve uygun montaj boşluğunun kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Gou vd. (2016) tek aile kullanımı için uygun, hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) ve atık su kaynaklı ısı pompası (WSHP) teknolojilerini entegre eden ön ısıtıcılı çift ısı kaynaklı bir banyo ünitesi geliştirmiştir. Çalışmada, duş atık suyunun ısını geri kazanarak sistemin performans katsayısını (COP) artıran bir ön ısıtıcı önerilmiş ve sistemin farklı işletim koşulları ASPEN PLUS yazılımı ile simüle edilmiştir. Yapılan analizlerde, ön ısıtıcılı sistemin COP değerinin 6,588'e, ön ısıtıcısız sistemin COP değerinin ise 4,677'ye ulaştığı; optimum koşullar altında teorik COP değerinin 9,784 seviyesine çıkabildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, atık su sıcaklığı, akış hızı ve şebeke suyu sıcaklığı gibi parametrelerin sistem performansı üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, atık suyun ve nemli havanın geri kazanımı yoluyla ev tipi ısı pompalı su ısıtıcılarının enerji verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir.

1.2. ISI POMPASI

Isı pompası sistemleri; mahal, proses veya kullanım sıcak suyu gibi alanlarda ısıtma amacıyla hava, su, toprak ya da atık ısı kaynaklarında bulunan ısı enerjisiyi soğutma çevrimi prensibine göre alıp, bu enerjiyi bir ısı taşıyıcı akışkan aracılığıyla suya aktaran cihazlardır. Gerektiğinde elektrikli rezistanslar veya fosil yakıtla çalışan yardımcı ısıtıcılarla desteklenebilirler. Aynı çevrimi ters yönde çalıştırarak ortamın soğutulmasını da sağlayabilirler (İSKİD, 2024).

Bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak ısı enerjisi üretir. Temel çalışma prensipleri, düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınan ısıнын, mekanik iş (örneğin kompresör gücü) yardımıyla yüksek sıcaklıktaki bir ortama aktarılması esasına dayanır. Normal şartlarda ısı, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru doğal bir akış gösterirken; ısı pompaları bu yönü tersine çevirerek ısıtma işlevini yerine getirir. Kış aylarında ısıtma, yaz aylarında ise soğutma amacıyla kullanılabilen bu sistemlerde, soğutucu akışkan sayesinde iç ve dış ortam arasında enerji transferi sağlanır. Elde edilen ısı, eşanjör aracılığıyla su dağıtım sistemine aktarılır. Tüm bu süreç yalnızca elektrik enerjisi kullanılarak yürütülür. Isı pompalarının önemli bir avantajı, hem ısıtma hem de soğutma işlevlerini tek bir sistem üzerinden gerçekleştirebilmeleridir. Günümüzde birçok yapıda bu iki işlev için ayrı sistemlerin kurulması ilk yatırım maliyetini artırırken, ısı pompaları tek bir çevrimle her iki ihtiyacı da karşılayabilir. Ayrıca, klasik ısıtma ve soğutma sistemlerine kıyasla işletme maliyetleri daha düşüktür (Karabulut, 2024; Evlice, 2024; Hepbaşlı & Kalıncı, 2009; Doğan, 2020). Şekil 1’de ısı pompasının çalışma düzeni şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1: Isı Pompası Çalışma Düzeni Şematik Gösterimi

1.2.1. Isı Pompası ve Tarihsel Gelişim Süreci

Isı pompası ilk olarak 1824’te Said Carnot tarafından basit bir prensip ile ileri sürülmüştür. Bu çalışmanın ardından Lord Kelvin (W. Thompson) 1852’de evlerde soğutma çevriminin kullanılabileceğini belirterek ısı pompalarına ilişkin temel prensibi ortaya koymuştur. Jakop Perkin ise 1832’de buhar sıkıştırırmalı bir soğutucunun tasarımını gerçekleştirmiştir. 19. yy’da gerçekleştirilen çalışmalar ile gaz sıcaklığının basıncın ayarlanması ile değiştirilmesinin mümkün olduğu anlaşılmış olup daha yüksek seviyede sıcaklıkların pompalanması ihtimali üzerinde durulmuştur. 1851’de Dr. John Gorrie tarafından

patenti Amerika’da alınmış olan soğutma makinası ticari anlamda imal edilmiş olan ilk soğutma makinasıdır. Yine 1851’de Ferdinand Carre Fransa’da ilk amonyak absorbsiyon ünitesinin tasarımını gerçekleştirmiştir. Dünya üzerinde ticari anlamda buz yapmak amacıyla kompresyon makinesinin patenti ise Alexander CatlinTwining tarafından alınmıştır. Sıkıştırılmış buhar ile çalışan ısı pompası prensibi is 1870-1880’li yıllar arasında Paul Piccard tarafından İsviçre’de ortaya konmuştur. Jordan ve Threlkeld tarafından 1954’te AEIC-EEI Isı Pompası Komitesi tarafından 1956’da güneş enerji destekli ısı pompaları ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Albuquerque’de bulunan birofis binasının ısıtılması ve soğutulması kollektör ısı pompası sistemi ile sağlanmıştır. Burada bu sistemin kullanılmasının ardından konut binaları için de kullanılmaya başlanmıştır.1950-1960’lı yıllar arasında piyasada ısı pompalarının düşük kalitede olması, kış mevsimlerinin soğuk geçmesi, çalışma şartlarının elverişli olmaması nedenleriyle çalışmalar başarısız olmuştur. Çalışmaların başarısızlığı ısı pompası endüstrisini de olumsuz etkilemiş olsa da 1970’li yıllarda petrol fiyatlarının artması ile ısı pompaları yeniden ilgi odağı olmayı başarmıştır (Karabulut, 2024).

Isı pompası enerji aldığı kaynağı ısıtma konumunda çalışırken soğutan, serinletirken de ısıtan bir sistemdir. Buradaki işlem gazın faz değişimi ile enerjinin alınıp taşınmasında oluşmaktadır. Bu noktada ısı pompaları aynı zamanda birer soğutma makinesi olmaktadır. Fakat soğutma amacının hangi yönde kullanıldığı önem göstermektedir. Isının çekilerek taşınması ile ısının fazla olduğu ortam soğutulur. Yaz aylarında bu prensibe dayanarak mekânların soğutulur ve kış aylarında ise ısıtılması için gerçekleşmektedir (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Şekilde görülebileceği gibi bir ısı pompası sistemin çalışma şeması ve termodinamiği soğutma makineleriyle aynıdır. Isı pompası sistemlerin farkı çalışma amaçlarında değişkenlik olmasıdır. Isı pompası sistemleri bu nedenle kontrol etme bileşenleri büyük önem taşır (Mechmet, 2023)

Soğutma makineleriyle aynı termodinamikte çalışan ısı pompası sistemler ilk olarak 1824’te Carnot tarafından tanıtılmıştır. Uygulamaya geçirilmesi Lord Kelvin tarafından 1850 yılında soğutma makinelerin ısıtma amacıyla da kullanılması önermesiyle olmuştur. Sonrasında birçok bilim insanı ve mühendisler 80 yıl gibi bir sürede yaptıkları çalışmalar ve araştırmalar sonucunda ısı pompasını konfor ısıtmasında uygulanabilir hale getirmişlerdir (Couvillion, 1985). 1824 yılında Carnot tarafında ortaya atılan bir teori ısı pompasının temel prensibi haline gelmiştir (Ünlü, 2005). Buhar makinesinde üretilmiş olan güç dışarıdan verildiğinde sıcak ve soğuk çevrim sağlamaktadır. Bu durumda sistem bir buhar makinesi olmaktan çıkmaktadır ve sıcak olan ortamdan soğuk olan ortama ısı enerjisi aktaran makineye dönüşmektedir. Bu çevrim

Carnot Döngüsü olarak bilinmektedir ve ısı pompası ile termodinamiğin temel prensipi olmuştur (Eskilson, 1987; Mehmet, 2023).

Isıtma yaptığı sürece soğutan bir yapıya sahip olan ısı pompası; sistemin çalışabilmesi için ısıtılacak ve soğutulacak ortamlara ihtiyacı vardır. Isıtılacak ortam genellikle evin iç mekânları iken soğutulacak olan ortamlar ise hava, toprak veya su kaynaklarından birisidir. Lord Kelvin 1850 yıllarında soğutma amaçlı kullanılan cihazların ısıtma amacıyla da kullanılabileceğini ileri sürmesiyle ısı pompası sistemleri uygulamaya girmiştir. 2. Dünya savaşında önce ısı pompası sistemleri için mühendisler ve bilim insanları bu alanda çalışmalar ve araştırmalar yapmıştır. Savaş yılları sırasında endüstri olanakları daha öncelikle problemler çıkardığı için çalışmalara ve araştırmalara ara verilmiş fakat savaşın bitmesiyle tekrar hız kazanmıştır (Couvillion, 1985; Mehmet, 2023).

Avrupa ve Amerika’da 1990’lı yıllarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan ısı pompasının kullanımı her geçen gün artış göstermektedir. Ancak Türkiye’de ısı pompası sistemlerin sunduğu bütün avantajlar uygun olmasına rağmen halâ ciddi bir kullanıcıya ulaşılamamıştır. Türkiye’de ısı pompası sistemleri 1990’lı yılların ortalarında uygulanmaya başlamıştır. Türkiye’deki ısı pompası sistemleri kullanıcıları genellikle yurt dışında bu sistemi görmüş, avantajlarını keşfetmiş ve yaşamış olan kişilerdir. Türkiye’ye döndüklerinde bu sistemi kendi evlerinde talep ederek kullanmaya başlamışlardır (Ünlü, 2005; Mehmet, 2023).

Isı pompası iç ortamı ısıtma işlemi yaparken enerjiyi aldığı kaynağı soğutur ve serinletme yaparken ise enerji aldığı kaynağı ısıtmaktadır. Buradaki yapılan işlem, gazın faz değişimi ile enerji alma ve bu enerjiyi taşımaktır. Bu işlem sırasında bir miktar enerji harcanmaktadır. Burada harcanan enerji elektrik enerjisidir. 1 kw alınan toplam ısı enerjisini ne kadarlık bir ısı enerjisine dönüştürüyor ise o değer cihazın COP değerini vermektedir (Sarbu & Sebarchievici, 2014). Isı pompası sistemlerinde ihtiyaç duyduğumuz enerjiyi 4’te 3’ünü doğadan (hava, toprak, su), geri kalan 4’te 1’ini elektrik enerjisinde karşılanmaktadır. Isı pompası sistemleri çoğunlukla kış aylarında ısıtma amacıyla kullanılırken yaz aylarında serinletme amacıyla da kullanılabilmektedir (Ünlü, 2005; Mehmet, 2023).

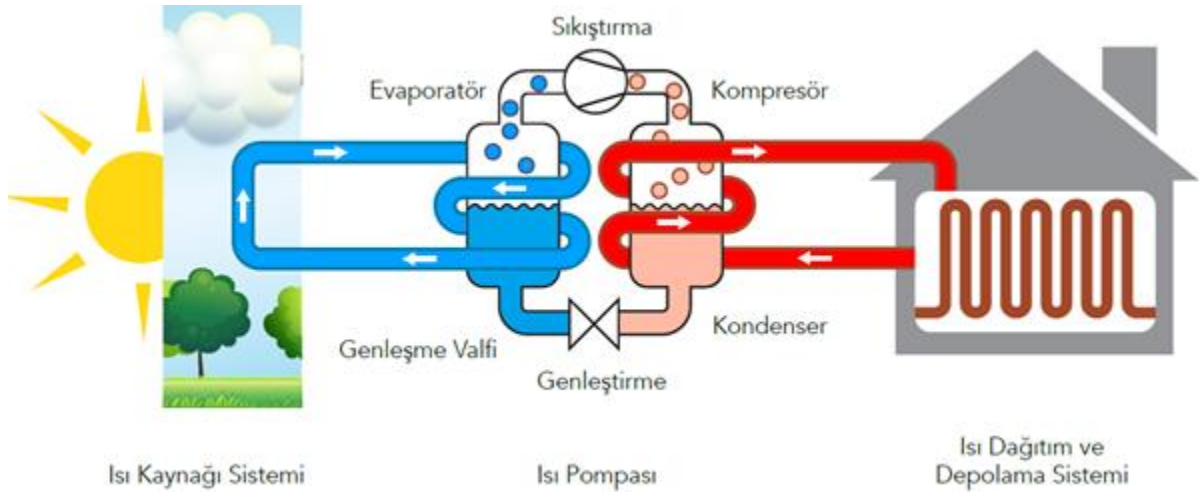


Şekil 2: Isı Pompasının Enerji Dönüşüm Prensibi

Isı pompası sistemlerinde hava, toprak (yatay veya dikey) ve su olmak üzere 3 ana ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Yapının bulunduğu iklim, coğrafi koşulları ve amaca göre kaynak seçimi yapılmaktadır. Önemli olan ısı kaynağının olabildiğince sabit olmasıdır. Buradaki en stabil kaynak topraktır. Ancak ilk yatırım maliyeti diğer kaynaklara göre oldukça yüksektir. Yaklaşık olarak toprağın 1 metre altı; ocak aylarında Ankara’da 12°C, İstanbul’da 8°C, İzmir’de ise yaklaşık 14°C civarlarındadır. Hava sıcaklıkları sürekli ve çok fazla değişiklik göstermektedir (Erdoğan vd., 2006).

1.2.2. Isı Pompası Çalışma Prensipleri ve Elemanları

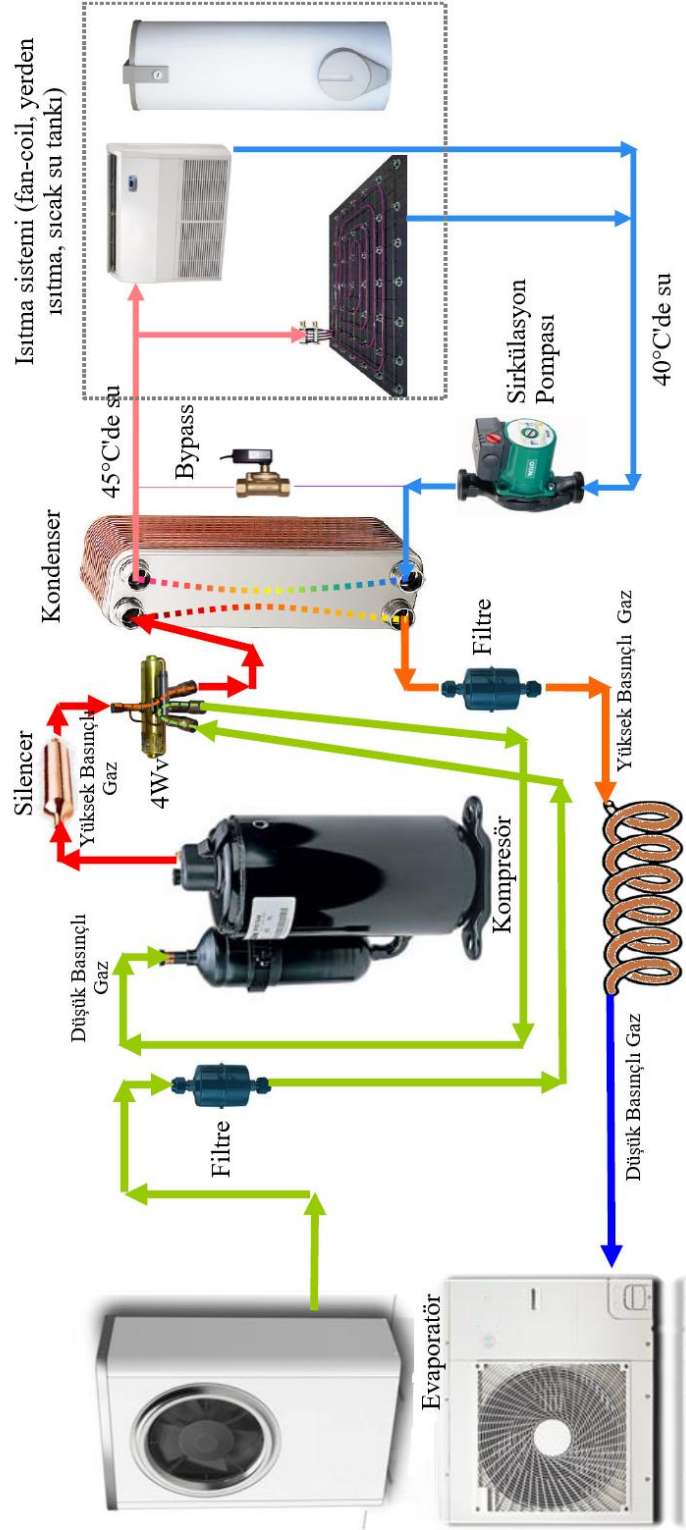
Isı pompası sistemleri, kapalı çevrimde çalışan ve ısı enerjisinin taşınmasını sağlayan soğutucu akışkanlara dayanır. Çevrim buharlaştırıcıda başlar; burada soğutucu akışkan, çevresindeki ortamdan ısı alarak buhar fazına geçer. Buhar halindeki akışkan, kompresör tarafından sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı yükseltilir ve ardından yoğuşturucuya gönderilir. Yoğuşturucu kısmında yüksek basınçlı buhar, etrafındaki ortama ısı vererek yoğunlaşır ve sıvı faza dönüşür. Daha sonra bu sıvı, genleşme vanasından geçerken basınç ve sıcaklığı düşürülür. Bu işlem sonucunda akışkan, yeniden buharlaştırıcı koşullarına uygun hale gelir ve çevrim sürekli olarak kendini tekrarlar. Soğutma çevrimi ise bahsedilen çevrimin tam tersi şeklindedir (Şekil 3) (Mechmet, 2023; Sarbu & Sebarchievici, 2014).



Şekil 3: Isı Pompasının Çalışma Prensipleri (ECA)

Ana elemanlar ile ısı pompasının çalışma prensibini açıklarsak; Şekilde verilen yüksek sıcaklık ve basınçta kompresöre gelen gaz sıkıştırılıp kondensere gider kondensere gelen gaz çevreye ısı verip gaz fazından sıvı fazla geçer. Daha sonra expansion valfe (genleşme valfi) gelen soğutucu akışkan basıncı ve sıcaklığı dengelenip düşürülüyor. Düşük basınç ve sıcaklıktaki akışkan evaporatöre gider. Evaporatör ortamdaki sıcak havayı çeker ve ortama ısı

verir. Böylece basınç ve sıcaklığı düşmüş olur. Ortamdaki sıcaklığı çeken evaporatördeki akışkan gaz fazına geçer (buhar) ve kompresöre dönen gaz sıkıştırılıp sisteme basılıyor. Burada gerçekleşen çalışma prensibi hava kaynaklı, su kaynaklı ve toprak kaynaklı ısı pompalarında da bu şekildedir. Isı pompalarının tasarımı iklim şartlarının soğuk olduğu İskandinav kuzey bölgesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Karabulut, 2024; Rafferty, 1992).



Şekil 4: Isı Pompası Çalışma Prensibi ve Sistem Elemanları

Isı pompaları elemanları 4 ana ekipmandan oluşmaktadır. Bu ekipmanlar aşağıdaki gibidir:

- Kompresör
- Yoğuşturucu (Kondenser)
- Buharlaştırıcı (Evaporatör)
- Kısılma Vanası

Kompresör

Isı pompalarının en temel ve önemli elemanlarından biri olan kompresör, buharlaştırıcıdan gelen buhar fazındaki ve düşük basınçtaki soğutucu akışkanı sıkıştırarak yoğuşma basıncına ulaştırır. Isı pompalarında kullanılan kompresörler, farklı çalışma prensiplerine göre farklı tiplerde olabilir. Kompresör ısı pompasının performansını etkileyen en önemli güç tüketen ekipmandır. Isı performans katsayısı hesaplamalarında elden edilen enerji pay, kompresör gücü paydada olduğu için kompresör gücü mümkün olduğunca verimli seçilmelidir.

Yoğuşturucu (Kondenser)

Yoğuşturucular, ısı pompalarının temel bileşenlerindendir ve kompresörden çıkan kızgın soğutucu akışkan buharının ısını alarak yoğuştururlar. Hava soğutmalı yoğuşturucular, genellikle kanatlı borular ile imal edilirler ve ısını atacak su kaynakları bulunmayan durumlarda tercih edilirler. Büyük kapasiteli yoğuşturucu yükleri için büyük yüzeyler gerekebilir ve hava sıcaklığının değişkenliğinden dolayı kontrolü düzensizdir. Su soğutmalı yoğuşturucular ise yüksek sıcaklıktaki gazın ısını alarak suya aktaran yoğuşturucu tipidir. Daha büyük kapasiteli ticari yerler veya endüstriyel uygulamalar için daha uygundur, ancak bakım ve kontrol daha karmaşık olabilirken, daha iyi verimlilik sunarlar.

Buharlaştırıcı (Evaporatör)

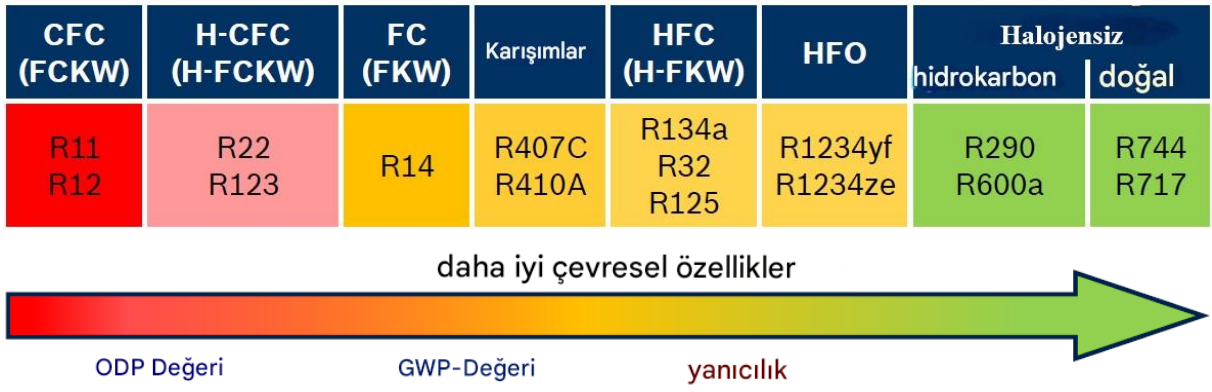
Soğutucu akışkanı buharlaştırmak için ısı çekmesini sağlayan evaporatörler uygulama gereksinimlerine ve koşullarına bağlı olarak çok çeşitli yapı ve boyutlarda olabilirler. Genellikle, buharlaştırıcılar yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerden oluşan demir, çelik, pirinç, bakır veya alüminyumdan üretilirler. Ancak zaman içinde yüzeylerde biriken kir, ısı direnci artırabilir. Dış yüzeylerde havadaki ısıyı çektiğinde toz ve buz birikimi, sudaki ısıyı çektiğinde ise tortu, soğutucu akışkanın iç yüzeylerinde ise yağ filmi veya tortu birikimi, önemli ısı dirençlerinin oluşmasına neden olabilir. Buharlaştırıcıların tasarımı, sıcaklık kontrolü, besleme yöntemi ve uygulama türüne göre büyük ölçüde değişkenlik gösterir.

Kısılma Vanası

Kısılma vanaları, kondenserden yüksek basınçta çıkan soğutucu akışkanın buharlaştırıcı basıncına düşürülmesini sağlar. İdeal koşullarda, bu elemandaki basınç düşürme işlemi sırasında entalpinin sabit olduğu varsayılır. Küçük sistemlerde, bu görevi kılcal borular gibi basit elemanlar yerine getirebilirken, daha büyük sistemlerde otomatik kısılma vanası ve termik kısılma vanası gibi daha karmaşık ve hassas elemanlar kullanılır. Kısılma vanaları, soğutucu akışkanın istenilen basınç seviyesine düşürülmesi işlevini yerine getirerek ısı pompasının verimli çalışmasına katkı sağlar.

Soğutucu Akışkanlar

Soğutucu akışkanlar, soğutma ve ısı pompası sistemlerinde ısıнын bir ortamdan diğerine taşınmasını sağlayan temel çalışma akışkanlarıdır. Bu akışkanlar, kapalı bir çevrim içinde buharlaşma ve yoğuşma süreçleriyle ısı transferini gerçekleştirir. Etkin bir soğutucu akışkan, yüksek ısı taşıma kapasitesine, uygun basınç koşullarına, kimyasal kararlılığa ve sistem malzemeleriyle uyumluluğa sahip olmalıdır. Bununla birlikte günümüzde soğutucu akışkan seçimi yalnızca termodinamik verimlilik açısından değil, aynı zamanda çevresel etkiler bakımından da değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP) ve Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) düşük olan çevre dostu akışkanlara yönelim artmıştır. Gelişen teknolojiler ve uluslararası çevre anlaşmaları doğrultusunda, geleneksel CFC ve HCFC türleri yerini HFC, HFO ve doğal soğutucu akışkanlara bırakmıştır. Soğutucu akışkanlar konusundaki gelişmeler, çevresel kaygılar ve enerji verimliliği gereklilikleri nedeniyle önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Geçmişte yaygın olarak kullanılan kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler), ozon tabakasının incelmeyeine ve yüksek küresel ısınma potansiyeline (GWP) yol açtıkları için büyük ölçüde terk edilmiştir. Günümüzde, hidrokarbonlar (propan/HC-290), amonyak ve karbondioksit gibi doğal soğutucular; düşük çevresel etkileri ve daha iyi enerji performansları sayesinde giderek daha fazla kabul görmektedir (Kivevele, 2022; Glavan vd., 2022). Ayrıca, yüksek GWP'li akışkanların kullanımını kademeli olarak azaltmayı amaçlayan Avrupa F-Gaz Yönetmeliği gibi düzenlemeler, düşük GWP'li yeni karışımların geliştirilmesini hızlandırmaktadır (Menegazzo vd., 2025; Anta vd., 2024). Şekilde, farklı soğutucu akışkan türlerinin çevresel etkileri ve bu etkilere göre sınıflandırılmaları görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 5: Soğutucu Akışkanlar ve Özellikleri

Soğutucu akışkanlar, ısı pompaları ve soğutma sistemlerinde ısıyı bir yerden başka bir yere taşıyan maddelerdir. Zamanla çevreye verdikleri zarar nedeniyle farklı türleri geliştirilmiştir. İlk kullanılan CFC (R11, R12) ve HCFC (R22, R123) tipi akışkanlar ozon tabakasına ciddi şekilde zarar verdikleri ve küresel ısınmaya yol açtıkları için artık kullanılmamaktadır. Yerlerine HFC (R134a, R32) ve karışım tipi karışım (R410A, R407C) gibi yeni nesil akışkanlar gelmiştir. Bu akışkanlar ozon tabakasına zarar vermez, ancak yine de küresel ısınma etkileri yüksektir. Son yıllarda geliştirilen HFO (R1234yf, R1234ze) akışkanlar çok daha düşük çevresel etkiye sahip, yani hem ozon tabakasına zarar vermez hem de küresel ısınma potansiyelleri oldukça düşüktür. Ayrıca doğal (R744, R717) ve hidrokarbon (R290, R600a) soğutucular çevre açısından en temiz seçeneklerdir, ancak bazıları yanıcı veya zehirli olabildiği için dikkatli kullanılmaları gerekir. Genel olarak, eski tip kırmızı renkli soğutuculardan yeşil renkli yeni nesil soğutuculara doğru geçildikçe çevreye verilen zarar azalmakta, ancak yanıcılık riski artmaktadır.

Bu kapsamda soğutucu akışkan seçimi yalnızca çevresel etkiler açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve güvenlik açısından da kritik öneme sahiptir. Örneğin, R455A ve R290 gibi düşük GWP'li akışkanlar, ticari soğutmada enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir (Hacı vd., 2023; Bernat & Bieńczyk, 2024). Bunun yanı sıra, gelişmiş sistem tasarımları ve operasyonel uygulamalar da enerji performansını doğrudan etkilemektedir. Değişken hızlı sürücüler, akıllı kontrol sistemleri ve iki aşamalı sıkıştırma çevrimleri, soğutma ve ısıtma uygulamalarında performans katsayısını (COP) artıran önemli teknolojilerdir (Acunha, 2025; Saleh vd., 2020).

Isı pompalarında soğutucu akışkan seçimi ve kullanımı, çevresel etkiyi en aza indirirken enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan kritik bir araştırma alanıdır. Küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve ozon tabakasının incelmeye potansiyeli (ODP) konusundaki endişeler arttıkça, düşük GWP'li ve çevre dostu soğutucu akışkanlara geçiş kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu durum,

verimliliği çevresel kaygılarla birleştiren çeşitli alternatiflerin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır.

Amonyak (R717): Yüksek enerji verimliliği ve sıfır ODP'si ile özellikle endüstriyel ve denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak toksik özellikleri nedeniyle güvenlik önlemleri kritik önem taşır (Glavan vd., 2022).

Karbondioksit (R744): İhmal edilebilir GWP'si, iyi termodinamik özellikleri ve transkritik çevrimlerde yüksek verimliliği ile öne çıkmaktadır (Li vd., 2021; Yang vd., 2021). Soğuk iklimlerde verimliliği artmakta, ancak yüksek çalışma basınçları sistem tasarımını zorlaştırmaktadır (Zhang vd., 2015).

Hidrokarbonlar (R290 – Propan, R600a – İzobütan): Çok düşük GWP değerleri ve yüksek verimlilikleri ile ticari soğutma ve ısı pompalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır (Hacı vd., 2023; Bernat ve Bieńczyk, 2024). Ancak yanıcılık riskleri güvenlik açısından dikkate alınmalıdır (Apriliyani vd., 2023).

Hidrofloroolefinler (HFO'lar): Düşük GWP değerleri ile öne çıkan HFO'lar, R1234yf gibi türleriyle verimlilik ve çevre dostu özellikleri bir araya getirmektedir (Fan vd., 2013; Wang vd., 2016).

Karışım Soğutucular: Çeşitli iklim koşullarına ve uygulama türlerine uygun hibrit çözümler geliştirmek amacıyla karışımlar tercih edilmektedir. Örneğin, RE170/DME veya R744/R600 gibi karışımlar çevresel sürdürülebilirliği korurken performansı artırmayı hedeflemektedir (Anta vd., 2024).

R32 Soğutucu Akışkan: Diflorometan olarak bilinen R32, R22 ve R410A'ya kıyasla düşük GWP'si (~675) ve yüksek enerji verimliliği ile öne çıkmaktadır. R410A'nın GWP'sinin (~2088) oldukça altında olan bu değer, R32'yi sürdürülebilirlik açısından cazip kılmaktadır (Hadi vd., 2023; Karthik vd., 2023). R32, mevcut HVAC sistemleriyle uyumluluğu sayesinde retrofit uygulamalarda da avantaj sağlamaktadır (Lv vd., 2022). Bununla birlikte, A2L sınıfı altında yanıcı özellik göstermesi güvenlik önlemlerini zorunlu kılmaktadır (Wu vd., 2024). Son yıllarda R32'nin R290 gibi doğal akışkanlarla karıştırılması, hem daha düşük GWP değerleri hem de daha yüksek enerji verimliliği sağlama yönünde umut verici sonuçlar vermektedir (Zhang vd., 2025; Karthik vd., 2023).

Dolayısıyla, ısı pompalarında soğutucu akışkan seçimi yalnızca termodinamik verimlilik açısından değil, aynı zamanda güvenlik, çevresel etki ve mevzuata uyumluluk açısından da kapsamlı bir değerlendirme gerektirmektedir (Neumaier vd., 2023; Mei vd., 2023;

Saengsikhiao vd., 2021). Performans, güvenlik ve ekolojik sorumluluğun dengelendiği bu yaklaşım, gelecekte sürdürülebilir ve enerji verimli ısı pompası teknolojilerinin gelişimine yön verecektir.

1.2.3. Isı Pompasının Temel Kavramları

Isı pompası teknolojisinin verimliliğini ve performansını değerlendirmek için çeşitli kavramsal göstergeler kullanılmaktadır. Bu göstergeler, sistemin farklı çalışma koşullarında ne kadar etkin ve ekonomik olduğunu belirlemeye yardımcı olur. Özellikle COP, SPF ve EER gibi parametreler, ısı pompalarının hem ısıtma hem de soğutma performansını tanımlamada temel ölçütlerdir. Bu kavramların doğru anlaşılması, ısı pompası seçimi ve enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Aşağıda bu temel performans göstergeleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

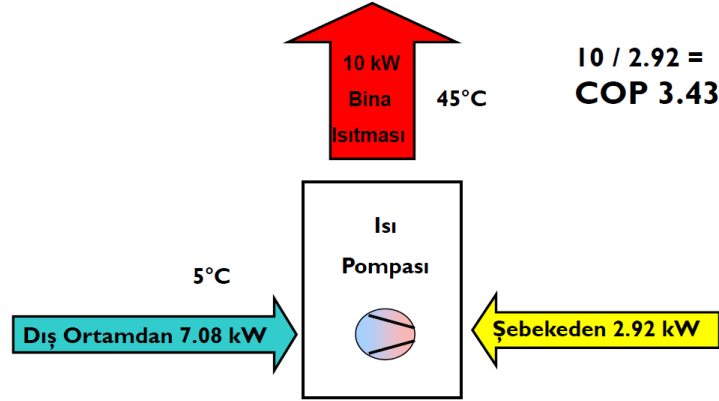
Tablo 1: Temel Performans Göstergeleri

Gösterim	Açıklama (İngilizce)	Açıklama (Türkçe)
1 COP	Coefficient of Performance	Isıtma Etki Katsayısı
2 SEK	Coefficient of Performance (Heating/Cooling)	Soğutma Etki (Tesir) Katsayısı
3 IEK	Coefficient of Performance (Cooling)	Isıtma Etki Katsayısı (Soğutma için)
4 EVO (EER)	Energy Efficiency Ratio	Enerji Verimlilik (Etkinlik) Oranı
5 IMPF (HSPF)	Heating Seasonal Performance Factor	Isıtma Mevsimsel Performans Faktörü
6 MEK (SCOP)	Seasonal Coefficient of Performance	Mevsimsel Etki Katsayısı
7 KMPF (CSPF)	Combined Seasonal Performance Factor	Kombine Mevsimsel Performans Faktörü

1.2.3.1. COP (Energy Efficiency Ratio) veya ısıtma etkinlik katsayısı

COP (Coefficient of Performance) değeri heat pump tarafından saatte üretilen elektriğin karşılık geldiği kullanılmaya uygun ısı miktarını ifade eder. COP (Coefficient of Performance) değeri dış ve iç ortamın sıcaklık değerlerine bağlıdır. COP (Coefficient of Performance) değeri ne kadar yüksekse ısı pompası o kadar verimlidir (Karabulut, 2024).

$$COP = \frac{\text{Isıtma Kapasitesi}}{\text{Güç Tüketimi}}$$



Şekil 6: Isı Pompası Performans Katsayısının (COP) Gösterimi

1.2.3.2. SPF (Sezonsal Performans Faktörü)

SPF değeri ısıtma ihtiyacı doğrultusunda tüm mevsimler süresince kullanılan çevre ekipmanları ile ısı pompalarının enerji tüketimini dikkate almaktadır (Karabulut, 2024).

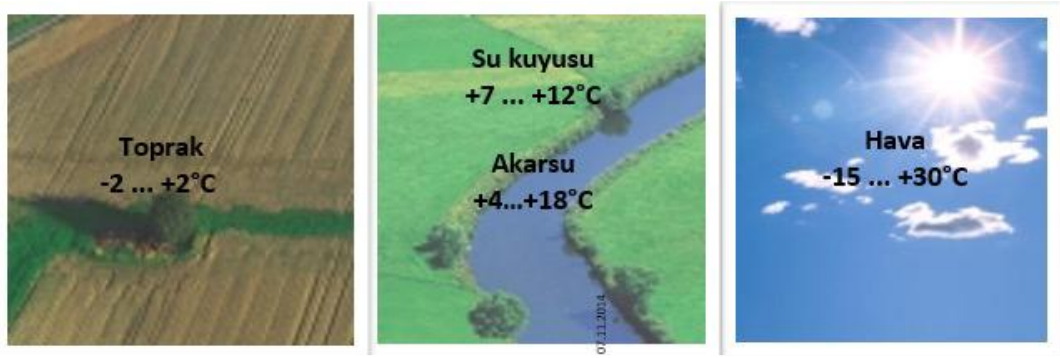
1.2.3.3. EER (Energy Efficiency Ratio)

Soğutma cihazında evaporatörde elde edilen soğutma kapasitesinin (kW), cihazın tükettiği toplam elektrik enerjisine (kW) oranıdır. EER (Energy Efficiency Ratio) değeri yalnızca soğutma amaçlı kullanılmaktadır (Karabulut, 2024).

$$EER = \frac{\text{Soğutma Kapasitesi}}{\text{Güç Tüketimi}}$$

1.2.4. Isı Pompası Çeşitleri

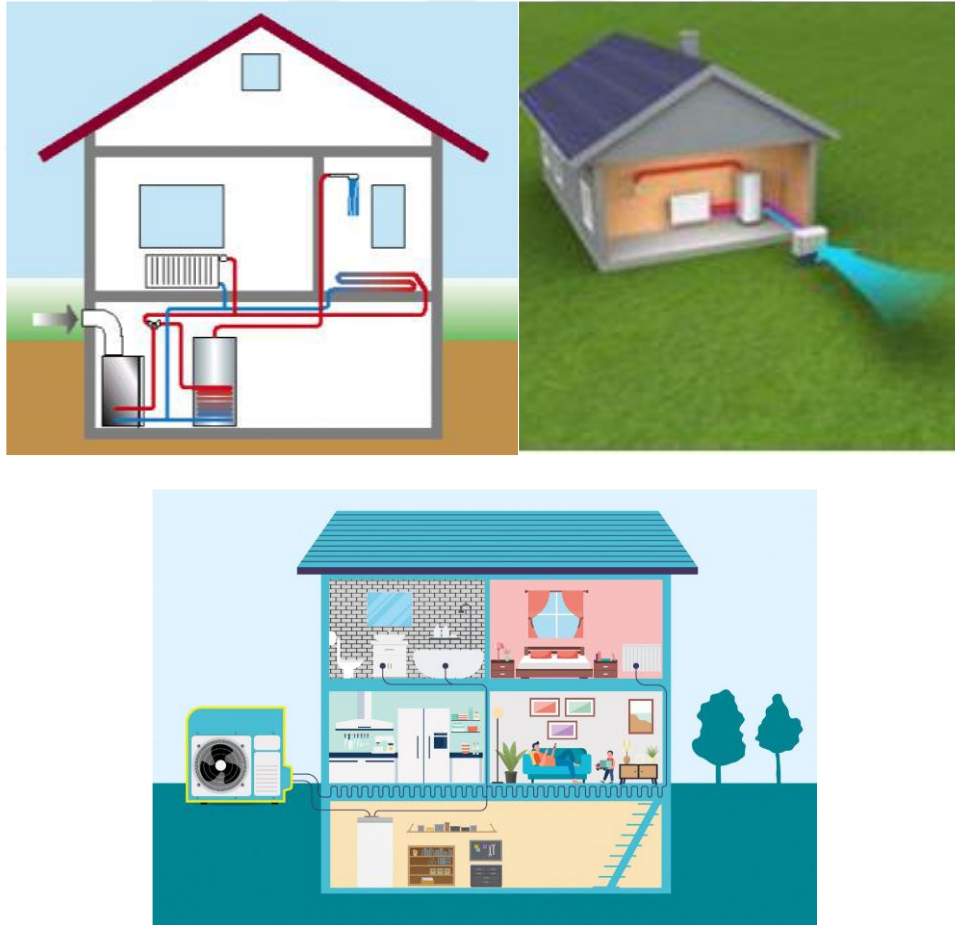
Isı pompaları çalışabilmeleri için yapıları gereği bir ortamdan ısı almaları gerekmektedir. Bu kaynak cinslerine göre ve ısıyı attıkları ortama göre ısı pompaları adlandırmaları yapılmaktadır. Bu kaynaklar ise genellikle hava, su ve topraktan oluşmaktadır. Kaynağın özelliği ısı pompasının verimliliğini ve maliyetlerini değiştirmektedir. Endüstrinin gelişmesiyle atık su ve endüstriyel atıklarda ısı kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 7: Isı Pompa Kaynakları

1.2.4.1. Hava kaynaklı ısı pompaları

Hava kaynaklı ısı pompası sistemleri, toprak ve yeraltındaki sulardan ısı almanın mümkün olmadığı yerlerde tercih edilmektedir. Genellikle bir ısıtma sistemine ek bir sistem olarak yapılmaktadır. İçinde donma engelleyici malzemeler olduğunda çok soğuk havalarda bile sorun çıkarmadan çalışmaktadır. Fakat sorun çıkarmadan çalışması için ısı pompasının yapının içinde, buharlaştırıcının (dış ünite) ise dış ortamda olmasına dikkat edilmelidir (Şekil 8) (Öztürk, 2015).



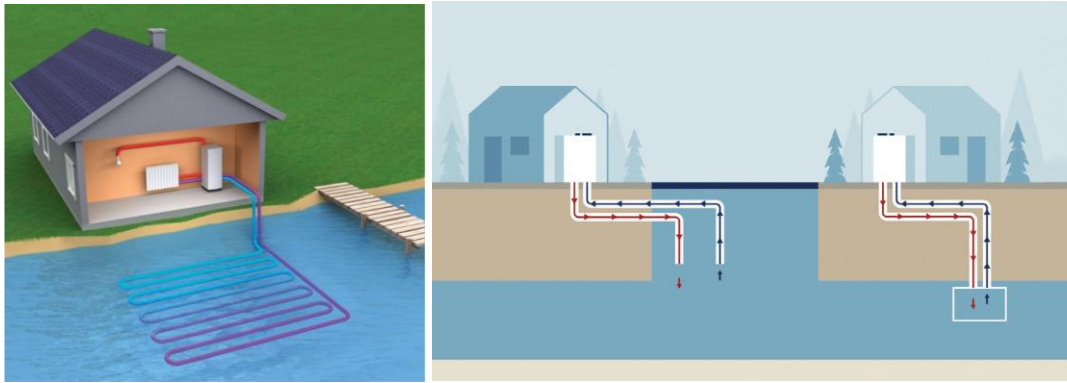
Şekil 8: Hava Kaynaklı Isı Pompası Tesisat Örneği (Öztürk, 2015; Mehmet, 2023; ECA)

Hava kaynaklı ısı pompaları ısı kaynağı olarak havayı kullandığı için en çok tercih edilen ve kullanılan ısı pompalarıdır. Kolay montajlanması, kullanımı ve bulunabilmesi ekonomiklik açısından avantajları olarak sayılabilir. Fakat dış havanın çok fazla değişken olması, özellikle gece ve gündüz arasında çok fazla sıcaklık farkları olması, ısı pompasının verimini düşürmektedir. Hava sıcaklığı 0°C 'nin altına düştüğü zaman evaporatörün (buharlaştırıcı) buzlanması dolayısıyla cihaz performansı düşerken, buradaki buzlanmayı gidermek için cihaz defrosta (ters yönde çalışarak buzları eritmek) girerek enerji kaybına neden olmaktadır (Çokgez Kuş vd., 2015; Evlice, 2024).

1.2.4.2. Su kaynaklı ısı pompaları

Yer altı sularının sıcaklığı yıl boyunca az değişiklik gösterdiği için bir ısı kaynağı olarak kullanmak mümkün olmaktadır. Yeraltı su kaynağı, göl, nehir, kuyu suyu veya şehir şebeke suyu kaynak olarak kullanılabilen ısı pompası çeşidin su kaynaklı ısı pompasıdır. Su sıcaklığı 8°C ile 12°C arasındaki suyun varlığı sistemin çalışabilmesi için yeterli olan ısıyı karşılamaktadır. Yer altı veya kuyu suyu kaynaklı ısı pompası sistemlerinde su alınıp sistemde kullanıldıktan sonra en az 15 metre uzaklıkta açılan bir diğer kuyuda tekrar yer altına verilmelidir. Ayrıca durgun su içerisine boruların uygun bir şekilde yerleştirilerek nehirler ve göller de su kaynaklı ısı pompasına ısı kaynağı olabilmektedir. Bunun sebebi su sıcaklığının yılın her döneminde çok fazla değişiklik göstermemesindendir (Öztürk, 2015).

Yüzey suları ısı pompası sistemlerinde açık veya kapalı devre olarak iki farklı şekilde ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Açık devre sistemleri, göl, deniz veya akarsu olarak nehirlerden alınan su, genellikle eşanjörü yardımıyla ısı pompalarında kullanılmaktadır. Isı alınan ve verilen yüzey sularındaki kimyasallara önlem alınmalıdır. Alınan yüzey suyu doğrudan ısı pompasına se devresinden verilmemelidir (Şekil 9) (Doğan, 2003).



Şekil 9: Yüzey Suyu Uygulaması (Mechmet, 2023)

Yüzey suyu kaynaklı ısı pompası sistemlerinde deniz, göl, gölet, nehir gibi büyük su kütleleri ısı kaynağı olarak kullanmak mümkündür. Deniz ve göl suları sıcaklıkları yaz ve kış aylarında değişiklik göstermesine rağmen havaya oranla çok daha az bir değişim göstermektedir. Nehir ve göl suyu kaynaklı ısı pompası sistemlerinde ısı alınacak olan suyun derinliği en az 2 metre olması ve yüzey alanın ısı pompası kapasitesi için her bir kW'ına 80m² olması gerekmektedir (Schibuola & Scarpa, 2016)

Nehir ve göl suyu kaynaklı ısı pompası sistemleri de yeraltı suyu kaynaklı sistemler gibi açık ve kapalı devre sistemler olarak uygulanabilmektedir. Açık devre sistemlerde sistem elemanlarının donma ve kirlenme riski oldukça yüksektir. Kapalı devre sistemlerde böyle bir risk bulunmaz çünkü sistem kendi içinde çalışacağından dolayı buna önlem alınabilmektedir (Doğan, 2003; Mehmet, 2023)

Yüzey suyu (nehir, göl) kaynaklı sistemlerin yatırım maliyeti toprak kaynaklı sistemlere göre daha uygundur. Fakat bu sistemlerin kullanımı yerel yönetimlerin (belediyelerin) düzenlemeleri, çeşitli kısıtlamalara ve bazı yasaklar ile karşılaşılabilir. Nehir ve göl sularının kullanılmasında genellikle ısıtma ihtiyacını karşılayabilmek için ek bir ısıtıcıya da gerek duyulabilmektedir (Schibuola & Scarpa, 2016).

Yeraltı suyunun bir kuyu yardımıyla alınarak ve en az 15 metre ilerinden tekrar başka bir kuyu yardımıyla yeraltına geri basılarak ısının çekilmesi enerjinin etkin kullanılması sağlamaktadır. Yılın her döneminde hemen hemen sabit olan yeraltı su sıcaklığı sebebiyle yüksek performans elde etmek mümkündür. Yeraltı suyunun ısı kaynağı olarak kullanılabilmesi için su miktarı, suyun kalitesi gibi etkenler önem taşımaktadır. Bölgede maksimum 20 metre derinliğinde yeraltı suyu ve yeterli miktarda olup olmadığı tespit edilmelidir (Doğan, 2003). Yeraltı suyu kaynaklı bir ısı pompası sisteminin enerji tasarrufu sağlayabileceğini ve işletme maliyetlerini düşürebileceğini göstererek endüstriyel ortamlardaki etkinliğini doğrulamaktadır (Yang vd., 2021).

Yeraltı suyunun yeterli miktarda, kalitede ve uygun derinlikte olması halinde ısı kaynağı olarak kullanmak mümkündür. Yeraltı sularını ısı kaynağı olarak kullanılması suyun 10 metre ve daha fazla derinlikte su sıcaklığının yüksek ve sabit olmasıdır. Yeraltı suları bulundukları pek çok bölgede 4°C ile 10°C arasında sabit bir sıcaklıkta olmasıdır. Yeraltı suyunun sıcaklığı, çıkarıldığı derinliğe, iklime ve bölgenin jeolojik yapısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Yeraltı suyu sıcaklığı mevsimden mevsime çok az değişiklik gösterdiğinden özellikle hava sıcaklığı yaz ile kış ayları arasında büyük değişiklik gösteren karasal iklimler için daha uygun

ve karalı bir ısı kaynağıdır. Yıl boyunca bir bölgedeki yeraltı su sıcaklığı yaklaşık olarak o bölgenin yıllık hava sıcaklığının ortalamasına eşittir (Zhang vd., 2020).

Yeraltı suyunun dezavantajlarından bazıları ise suyun her bölgede rahatlıkla bulunamaması, kalitesi düşük suların yol açtığı bazı sorunları olması, yerel yönetim ve yönetmeliklerden kaynaklanan kısıtlamalar ve çevre kirliliği oluşturma ihtimalinin bulunmasıdır (Şekil 10) (Doğan, 2003). Kaynak olarak su kullanıldığı takdirde, kullanılan suyun kalitesi de önemlidir. Su kalite testi, kesinlikle yapılmalı ve içerdiği mineraller korozyon probleminden ötürü önceden incelenmelidir. Suyu kaynak olarak kullanmanın bir başka avantajı ise, ısı değiştiricilerinde, ısı geçişinin daha yüksek olmasıdır. Ancak ısı değiştiricilerinin daha verimli ve kompakt yapılmaları gerekmektedir (Ataman, 1991; Erdem, 2007).



Şekil 10: Yeraltı Suyu Uygulaması (Zhang vd., 2020)

Endüstriyel uygulamalarda su kaynaklı ısı pompaları

Su Kaynaklı Isı Pompaları (WSHP'ler), enerji verimliliği ve çevresel faydaları nedeniyle endüstriyel uygulamalardaki önemi giderek artmaktadır. Bu teknoloji, ısıtma ve soğutma süreçlerinde termal enerji kaynağı olarak yeraltı suyu, yüzey suyu veya atık sudan gelen suyu kullanır. Araştırma, WSHP'lerin endüstriyel ortamlardaki çalışma prensiplerini, verimliliğini ve pratik uygulamalarını ele almakta ve son çalışmalar ve karşılaştırmalı analizlerle desteklemektedir. WSHP'ler, bir soğutma çevrimi kullanarak su kaynakları ile amaçlanan sistem arasında ısı transferi yaparak çalışır. Bu sistemlerin verimliliği, geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla performanslarını gösteren çok sayıda çalışmada vurgulanmıştır. Örneğin, WSHP'ler düşük dereceli ısı kaynaklarından yararlanarak, suyun termal kaynak olarak yüksek

enerji yoğunluğu sayesinde gelişmiş performans katsayıları (COP) elde edebilir (Han vd., 2024; Valančius vd., 2019). Ayrıca, çeşitli endüstriyel atık ısı kaynaklarına uyum sağlayabilmeleri çok yönlülüklerini ortaya koyar. Örneğin, çelik üretim tesislerinde WSHP'lerin bölgesel ısıtma sistemlerine entegre edildiğinde enerji verimliliğini artırdığı ve atık ısının geri kazanımını en üst düzeye çıkardığı gösterilmiştir (Zhang vd., 2019).

Yeraltı suyu kaynaklı ısı pompaları, ekonomik uygulanabilirlikleri ve enerji tasarrufu potansiyelleri açısından kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu sistemler, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için yeraltı suyundan termal enerji çekebilir, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir ve karbon emisyonlarını en aza indirebilir (Wei vd., 2012; Valančius vd., 2019). Çalışmalar, bu sistemlerin enerji tüketim oranının genel işletme maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü ve bu sayede önemli miktarda termal enerji gerektiren üretim süreçleri için cazip hale geldiğini göstermektedir (Han vd., 2024; Wang vd., 2022). Enerji tasarrufu mekanizması, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki artışla birleştiğinde, sürdürülebilirliğe yönelik küresel eğilimlerle uyumludur (Rusowicz vd., 2022).

Bağımsız uygulamalara ek olarak, WSHP'ler, endüstriyel süreçlerin termal çıktısını artırarak kombine ısı ve güç (CHP) sistemlerine entegre edilebilir (Zhang vd., 2017). Güneş veya atık ısıyı WSHP'lerle birleştiren hibrit sistemlerin yükselişi özellikle dikkat çekicidir. Örneğin, fotovoltaik sistemlerin su kaynağı teknolojisiyle birleştirilmesi, enerji geri kazanımını en üst düzeye çıkararak değişen termal yükler altında daha sorunsuz operasyonel ayarlamalar yapılmasını sağlar (Wang vd., 2015; Zhang & Xu, 2013). Bu tür çift kaynaklı sistemlerin uygulanmasının ekonomik açıdan faydalı olduğu kanıtlanmıştır ve ticari ve tarımsal tesisler de dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda operasyonel maliyetlerde ve karbon ayak izlerinde önemli azalmalar olduğunu gösteren kanıtlar mevcuttur (Yang vd., 2022).

Çok sayıda pratik çalışma, çeşitli çevre koşulları altında WSHP'lerin verimlilik etkilerini incelemiştir. Endüstriyel ısı talebinin yüksek olduğu veya soğuk iklimlere sahip bölgelerde, WSHP'ler nehir ve göl suyunu ısı değişim kaynağı olarak verimli bir şekilde kullanma ve mevsimler boyunca istikrarlı performans sağlama yeteneklerini kanıtlamıştır (Lepiksaar vd., 2021; Wang vd., 2013). Ancak, su kalitesi yönetimi ve termal kirlilik gibi zorluklar, sistem tasarımını ve işletimini optimize etmek, çevre düzenlemelerine uyumu sağlamak ve enerji geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için sürekli araştırmalar gerektirmektedir (Qin vd., 2012). Su Kaynaklı Isı Pompaları, verimlilikleri, ekonomik uygulanabilirlikleri ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olmaları sayesinde endüstriyel ısıtma ve soğutma uygulamaları için cazip bir çözüm sunmaktadır. Teknolojideki sürekli

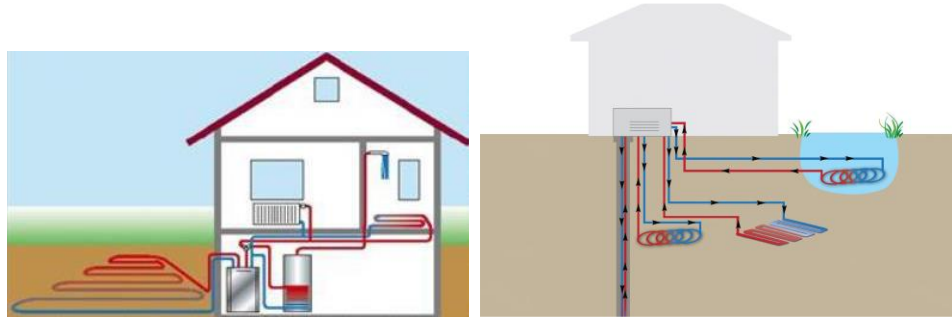
gelişmeler ve yenilenebilir enerjilerle entegrasyonlarının, endüstriyel sektörde benimsenmelerini daha da artırması beklenmektedir.

1.2.4.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları

Toprak altı, hemen hemen yılın her döneminde aynı sıcaklıktadır. Bu sebeple topraktaki ısı düzeyinden faydalanılarak ısıtma ve soğutma yapılabilir. Kış aylarında ısı toprak altından iç mekânlara, yaz aylarında iç mekânların ısısı toprak altına taşınabilir (Ünlü, 2005). Toprak kaynaklı ısı pompaları yatay ve dikey tip olmak üzere 2 çeşit olarak yapılabilir.

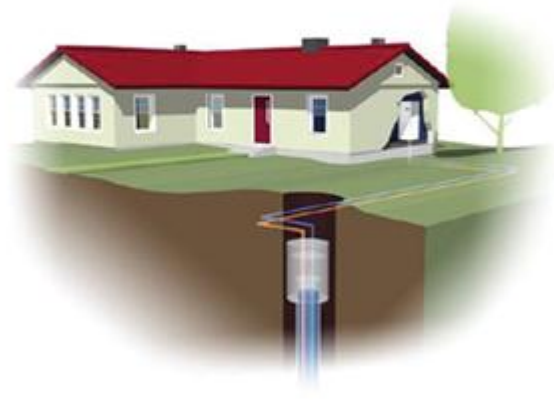
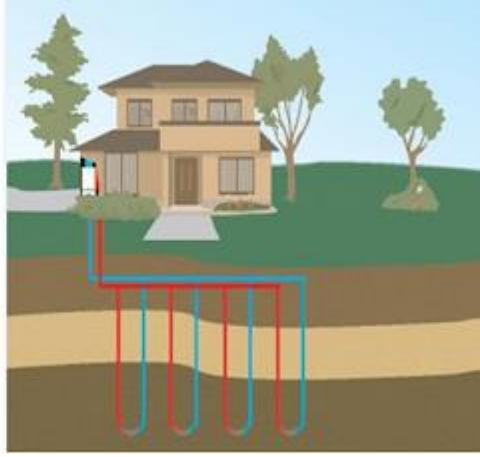
Yatay tip ısı pompası genellikle geniş arazilerde ve yeteri kadar kazı alanının olduğu yerlerde tercih edilmektedir. Isının elde edileceği ısı değiştirici boruları toprağın yaklaşık 1,5 ile 2 metre derinliğinde toprağın içine döşenmektedir (Evirgen, 2009).

Borular arasındaki mesafeler projenin büyüklüğüne ve elde edilmek istenen sıcaklığa ve verime göre değişiklik göstermektedir. Boru döşeme işlemlerinde borular yüzeye yakın olduğunda toprağın altına gömülen boruların etrafındaki toprağın iyice sıkıştırılması gerekir; aksi halde iyi bir verim elde edilememektedir. Yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin en büyük dezavantajı kazılacak olan alanın oldukça geniş alana ihtiyaç olmasıdır ve kazılacak alanın genişliğinin ve derinliğin artması ile yatırım maliyeti de artış göstermektedir (Şekil 11) (Kural, 2012).



Şekil 11: Yatay Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası (Kural, 2012; ECA)

Dikey tip ısı pompası sistemi ise arazi de yeterince kazı alanının olmadığı ve zeminin geniş bir şekilde kazılamayacağı araziler için tercih edilen bir sistemdir. Yüzeyin oldukça derin biçimde kazıldığı sistemlerdir. Kazılan alana farklı şekillerde boru döşenebileceği için borular arasındaki mesafenin verime etkisi oldukça yüksektir. Sistemin bir güzel özelliği de daha az boruya ihtiyaç duyulmasıdır (Şekil 12) (Kural, 2012).

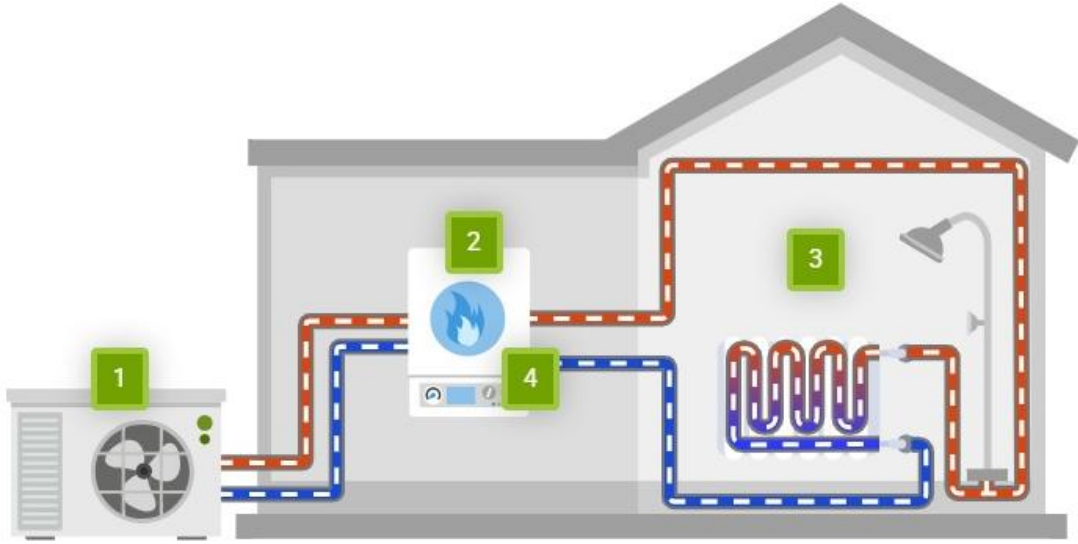


Şekil 12: Dikey Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası (Kural, 2012)

Toprak, yapısı gereği güneşten gelen enerjinin çoğunluğunu emerek içerisinde barındırır. Genellikle toprağa belirli mesafelerle serilen borular ile ısı kaynağı oluşturulur. Fakat bunun yapılabilmesi için geniş bir araziye ve yapının temelinden yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer yeterli genişlikteki araziler bulunmuyorsa yatırım maliyeti daha yüksek olan dikey borulamalar ile de yapılabilir. Genellikle 10 m derinlikten sonra toprak sıcaklığı sabit olarak varsayılabilir. Toprağın ısıl iletim katsayısı, özgül ısı kapasitesi ve yoğunluk sıcaklığa etki etmektedir. Bu etkenler ise toprağın içerdiği neme göre değişmektedir. Toprağın nemliliği, yerin yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir, çünkü toprak yapısı kayalık, kumlu veya killi gibi farklı olabilir. Bu nedenle, killi arazinin yüksek nem emebilme kapasitesi nedeniyle, bu tür zeminlerde uygulama yapmak mükemmel hale gelebilir (Seçikmiş, 2006; Evlice, 2024).

1.2.4.4. Hibrit sistemler

Yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte, konfor koşullarına olan talep artmış ve buna bağlı olarak mekân ısıtması ihtiyacı da önemli ölçüde çoğalmıştır. Ancak bu durum, fosil yakıt tüketiminin artmasıyla birlikte enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevresel kirliliğin artması gibi önemli sorunları da beraberinde getirmiştir (Bellos vd., 2016). Dolayısıyla, enerji verimliliği yüksek, çevre dostu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir ısıtma sistemlerinin geliştirilmesi günümüzde büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda, ısı pompası teknolojileri düşük sıcaklıktaki çevresel enerjiyi (hava, su veya toprak kaynakları) kullanarak yüksek verimle ısı üretimi sağlayabilmeleri nedeniyle önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Zhang vd., 2017; Cai vd., 2020).



Şekil 13: Hibrit Sistem Örnek Resim

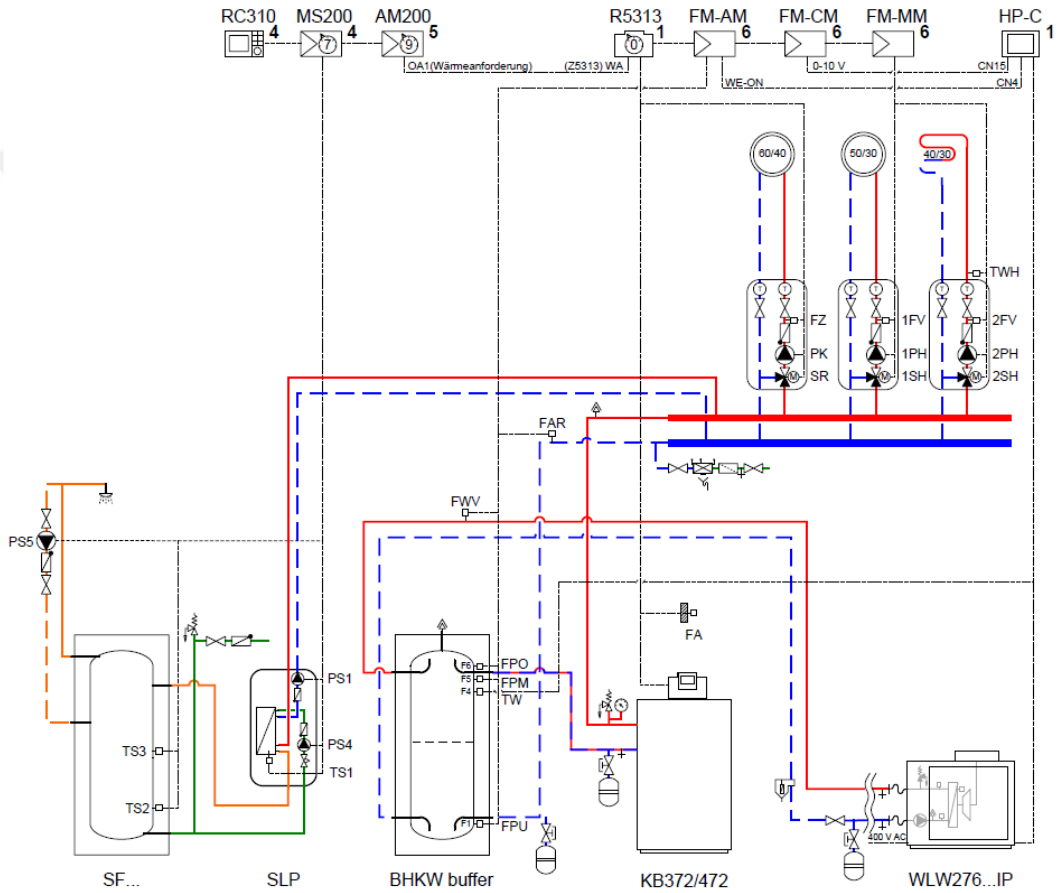
Hibrit ısı pompası sistemi, dış ortam havasından ısı enerjisi elde eden ısı pompası ile geleneksel bir kazan sisteminin birlikte çalıştığı, yüksek enerji verimliliği sağlayan bir ısıtma çözümüdür. Dış ortam ünitesi (1), çevreden düşük sıcaklıktaki ısıyı çekerek soğutucu akışkan aracılığıyla sisteme aktarır. Elde edilen bu enerji, binanın ısıtma devresine yönlendirilir. Ancak dış hava sıcaklığının çok düşük olduğu koşullarda ısı pompası tek başına yeterli ısı üretimi sağlayamadığında, kazan ünitesi (2) devreye girerek suyu ısıtır ve sıcak suyu hem radyatörlere hem de kullanım noktalarına (3) iletir. Radyatörlerde ısınıp bırakan su, geri dönüş hattı (4) üzerinden yeniden kazana veya ısı pompasına yönlendirilerek çevrim tamamlanır. Bu sayede sistem, çalışma koşullarına bağlı olarak ısı pompası ve kazanın en uygun şekilde devreye girmesini sağlar; böylece enerji verimliliği artarken karbon salımı ve işletme maliyetleri azaltılır.

Hibrit sistemler, farklı ısı pompası teknolojilerini bir araya getirerek mevsimsel değişkenliklere ve enerji kaynaklarının bulunabilirliğine göre en uygun performansı sağlamayı hedefler. Örneğin hava kaynaklı ısı pompaları (ASHP) ve yer kaynaklı ısı pompaları (GSHP) gibi farklı teknolojileri bir araya getirerek mevsimsel koşullara ve enerji bulunabilirliğine bağlı olarak optimum performans sağlar. Bu iki teknolojinin birlikte kullanılması, sistemin dış ortam sıcaklığına bağlı verim kayıplarını önler ve sürekli yüksek performans elde edilmesini sağlar. Ayrıca hibrit yapılar, enerji verimliliğini artırmak için yalnızca tek bir kaynağa bağımlı kalmaz; farklı kaynaklar arasında otomatik geçiş yapabilir ya da birden fazla kaynağı aynı anda kullanabilir. Bu esneklik, kullanıcıya hem enerji maliyetlerini düşürme hem de karbon salımını azaltma avantajı sunar. Bu nedenle hibrit sistemler, sürdürülebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi açısından önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Mohammed vd., 2024).

Endüstride yüksek basınçlı buhar üretimi için kullanılan kazanlar, enerji dönüşümünde temel ekipmanlardır ve genellikle fosil yakıtlar veya biyokütle gibi kaynaklarla çalışırlar. Ancak bu sistemler, yakıtın doğrudan yanması sonucu önemli miktarda enerji kaybına ve çevresel emisyonla neden olmaktadır. Bu nedenle kazan sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında atık ısıнын geri kazanımı, yanma sürecinin optimizasyonu ve kondensat geri kazanımı gibi uygulamalar yer almaktadır. Günümüzde bu çözümlere ek olarak, ısı pompalarının kazan sistemleriyle entegre edilmesiyle oluşturulan hibrit sistemler, enerji verimliliğini daha da artıran yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Isı pompası, kazan besli suyunu veya besleme havasını önceden ısıtarak kazanın yakıt tüketimini azaltmakta, böylece hem işletme maliyetlerinde hem de CO₂ salımlarında düşüş sağlamaktadır. Bu tür hibrit kurulumlar, kazanın yüksek sıcaklık gereksinimini karşılarken ısı pompasının düşük sıcaklıkta yüksek COP (Coefficient of Performance) değerlerinden yararlanarak sistemin toplam enerji performansını optimize eder (Vo vd., 2024). Ekonomik uygulanabilirlik, ısı pompası benimsenmesinde tutarlı bir temadır. Çalışmalar, ısı pompaları için ilk yatırımın yüksek olabilmesine rağmen, enerji maliyetlerinde sağlanan kümülatif tasarrufların, potansiyel devlet teşvikleriyle bir araya geldiğinde, yatırımın olumlu geri dönüşlerine yol açabileceğini göstermektedir (Murano vd., 2024; Guo, 2024). Kazan sistemleri ile ısı pompalarının bir araya getirilmesiyle oluşturulacak hibrit sistemler, enerji verimliliği ve işletme ekonomisi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Isı pompalarının mevcut kazan sistemleriyle entegre edilmesi, maliyet tasarruflarını en üst düzeye çıkarabilir ve verimliliği artırabilir; bu da bu tür hibrit kurulumların ekonomik etkinliğini göstermektedir. Bu tür bir entegrasyonda ısı pompası, kazan besli suyunu önceden ısıtarak kazanın yakıt tüketimini azaltmakta, böylece hem enerji tasarrufu sağlamak hem de CO₂ emisyonlarını düşürmektedir. Ayrıca, ısı pompasının çalışma koşullarının kazanın atık ısısından faydalanacak şekilde optimize edilmesi, sistemin toplam performans katsayısını (COP) artırmakta ve işletme maliyetlerini düşürmektedir. Dolayısıyla, kazan ile ısı pompasının birlikte çalıştığı hibrit bir sistem, geleneksel kazanlara göre daha sürdürülebilir, çevreci ve ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Vo vd., 2024).



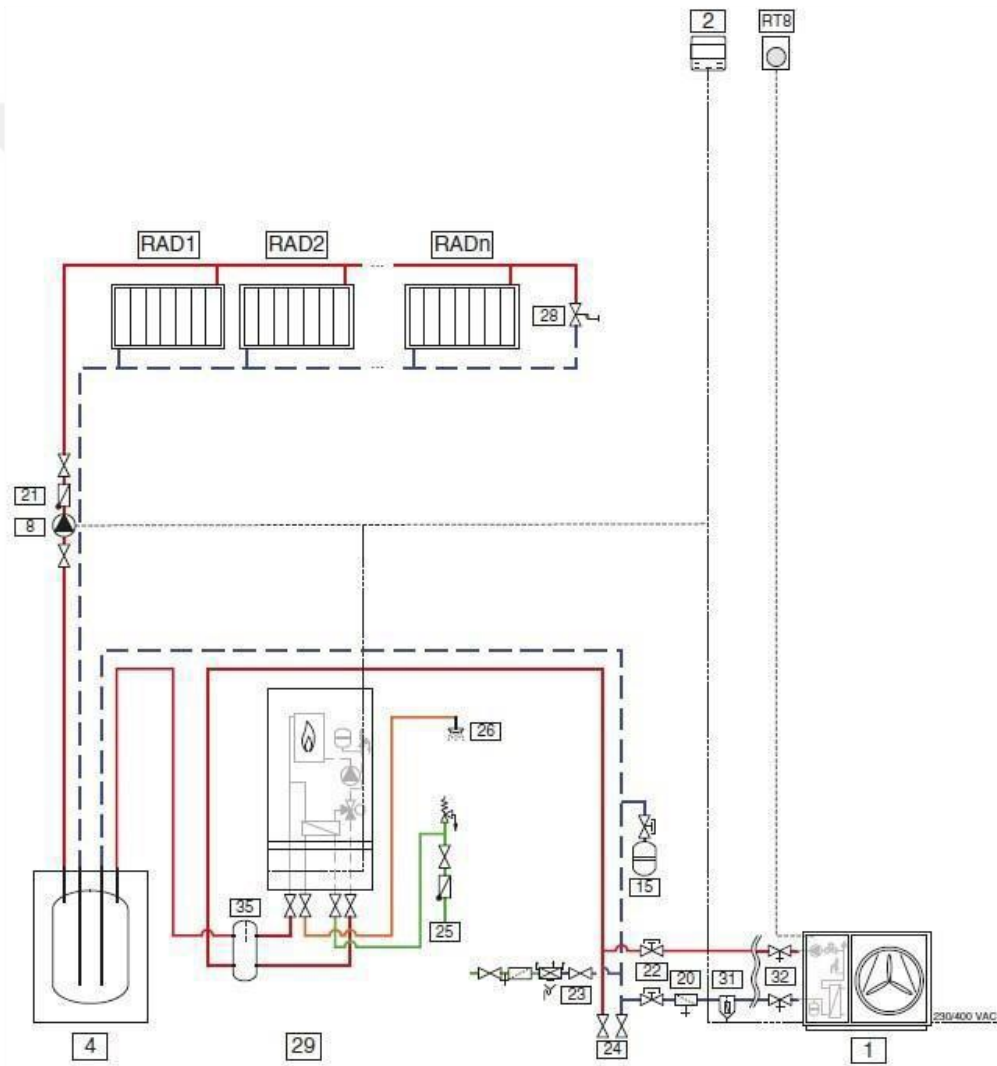
Şekil 14: Hava Kaynaklı Isı Pompası ve İç Ünite Sistem Bileşenleri



Şekil 15: Isı Pompası ve Isı Depolama Sistemine Ait Hidrolik Devre Şeması

Şekilde, bina ısıtma sisteminde kazan (KB372/472) ile ısı pompasının (WLW276.IP) birlikte çalıştığı örnek bir hibrit bir sistem gösterilmektedir. Sistem; sıcaklık, basınç ve debi sensörleri (TS, PS), kontrol modülleri (FM, AM, MS) ve ara tampon tankları (BHKW buffer, SLP) aracılığıyla otomatik olarak yönetilmektedir. Isı pompası, dış ortam sıcaklığının uygun olduğu durumlarda ana ısıtma kaynağı olarak çalışır ve düşük sıcaklıkta yüksek verimle ısı üretir. Dış hava sıcaklığının düşmesiyle birlikte, sistem kontrol modülü tarafından kazan devreye alınarak ilave ısı sağlanır. Böylece enerji üretimi, her koşulda optimum verimlilikte

gerçekleşir. Tampon (buffer) tankları, hem ısı pompasından hem de kazandan gelen ısıyı depolayarak sistemin yük dengelemesini sağlar. Bu sayede ısı pompası sık devreye girip çıkmadan sabit verimde çalışır, enerji kayıpları azalır ve ekipman ömrü uzar. Kırmızı hatlar sıcak akış hattını, mavi hatlar soğuk dönüş hattını temsil etmektedir. Sensörlerden alınan verilerle kontrol sistemi, akış yönlerini ve aktif ısıtma kaynağını otomatik olarak belirler. Bu yapı, mevsimsel koşullara göre ısı pompası ve kazanın dönüşümlü veya birlikte çalışmasına olanak tanır. Hibrit sistem yapısı sayesinde hem fosil yakıt tüketimi azaltılmış hem de elektrik enerjisinin ısı pompası üzerinden yüksek COP değerlerinde değerlendirilmesiyle önemli düzeyde enerji tasarrufu sağlamaktadır.

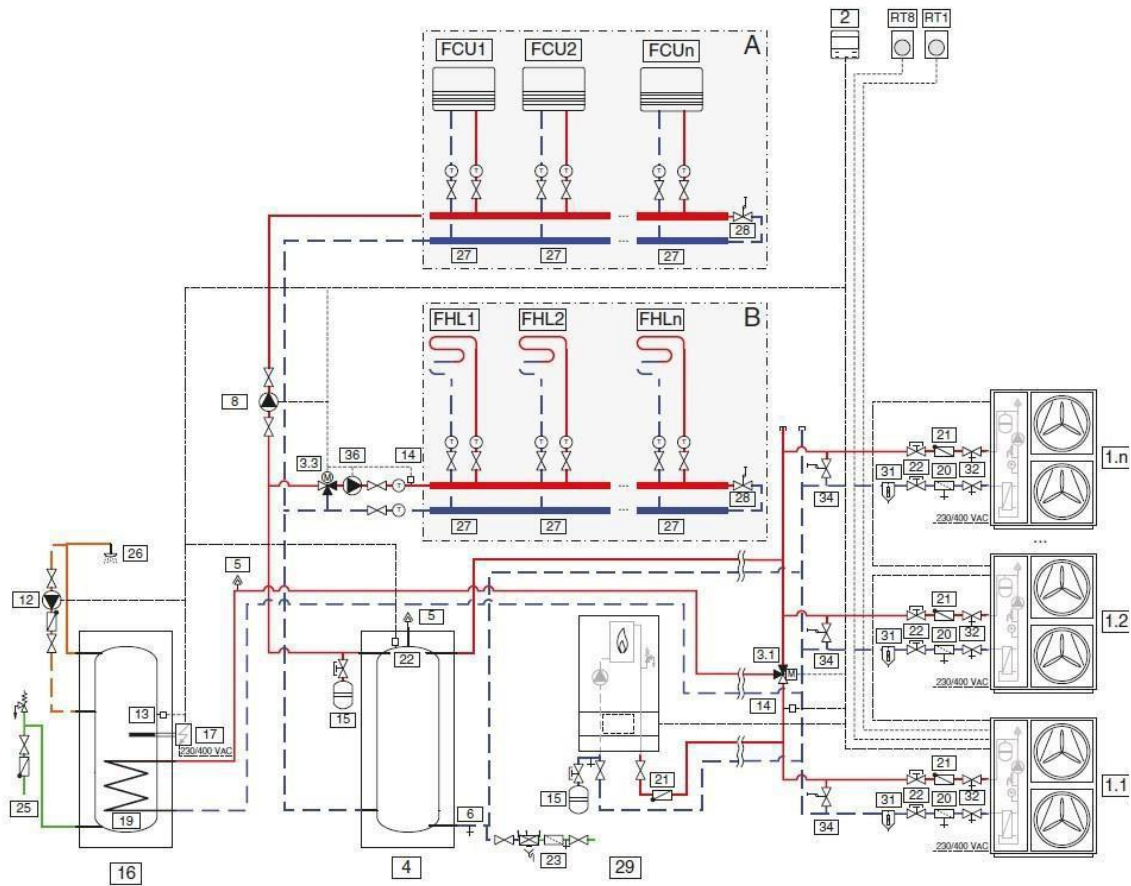


Şekil 16: Kombi ile Kullanılan Hibrit Isı Pompası Sistemi Şeması

Şekil 16’da ısı pompası ile kombi sisteminin entegre edildiği hibrit bir ısıtma sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu sistem, dış ortam koşullarına bağlı olarak ısı pompası ve

kombi (harici ilave ısıtıcı) arasında otomatik geçiş yapabilen akıllı bir kontrol stratejisine sahiptir.

Isı pompası (1), dış ortam havasından elde ettiği ısı enerjisini ısıtma devresine aktararak yüksek enerji verimliliğiyle ısıtma sağlar. Ancak dış hava sıcaklığının düşük olduğu ve ısı pompasının kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda, kombi (29) devreye girerek ek ısı güç sağlar. Böylece sistem, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını hem de konfor sürekliliğini güvence altına alır. Radyatör devresi (RAD1-RADn), kullanıcı mahallerine ısı transferini gerçekleştirmektedir. Sistemdeki üç yollu vana (21), sirkülasyon pompası (15) ve kontrol elemanları (RT8, 2) akış yönü ve sıcaklık kontrolünü otomatik olarak düzenlemektedir. Boyler (4) ise ısı pompası veya kombi tarafından üretilen ısıyı depolanmasını sağlayarak sistemin kararlılığını artırmaktadır. Bu hibrit yapı sayesinde, düşük sıcaklıklı çalışma koşullarında ısı pompası öncelikli, yüksek yük gereksinimlerinde ise kombi destekli çalışma sağlanmakta; böylece enerji verimliliği, ekonomik işletme ve karbonsuz ısıtma hedefleri birlikte gerçekleştirilmektedir.



Şekil 17: Kaskad Bağlantılı Isı Pompası ve Harici İlave Isıtıcı Şeması

Şekil 17’de, birden fazla ısı pompasının kaskad bağlantı ile birlikte çalıştığı, harici bir ilave ısıtıcı ve sıcak kullanım suyu üretim devrelerini içeren merkezi ısıtma sistemi gösterilmektedir. Bu sistem, yüksek kapasite gerektiren yapılarda ısıtma yükünü birden fazla ısı pompası arasında paylaştırarak enerji verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Kaskad yapı sayesinde ısı pompaları, ısıtma ihtiyacına göre sırayla devreye girip çıkarak sistemin modüler ve esnek çalışmasını sağlar. Dış ortam sıcaklığının düşük olduğu koşullarda harici ısıtıcı (kombi veya kazan) devreye girerek ek ısıtma desteği sağlar. Sistem aynı zamanda sıcak kullanım suyu ve farklı ısıtma bölgelerini (fan-coil, yerden ısıtma vb.) besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu bütünleşik yapı, hem yüksek enerji verimliliği hem de kesintisiz ısıtma performansı sağlayarak hibrit ve çok bölgeli uygulamalarda optimum işletme koşulları sunmaktadır.

Hibrit Sistemlerde Dikkat Edilecek Hususlar

Hibrit ısıtma sistemleri, ısı pompası, kazan ve sekonder ısıtma devreleri gibi farklı enerji kaynaklarının bir arada çalıştığı, verimliliği yüksek ve esnek sistemlerdir. Ancak bu sistemlerden maksimum performans alınabilmesi için, tasarım, kontrol ve işletme aşamalarında bazı önemli hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Öncelikle, sistemin tüm bileşenleri - kazan, ısı pompası ve sekonder devreler -tek bir kontrol birimi üzerinden yönetilmelidir. Farklı cihazların bağımsız olarak çalıştırılması, enerji kayıplarına, sıcaklık dengesizliklerine ve verim düşüşüne yol açabilir. Bu nedenle merkezi bir kontrol sistemi, hem enerji yönetimini hem de sıcaklık dağılımını optimize etmelidir.

Isı pompasının verimliliği dış ortam sıcaklığına doğrudan bağlı olduğundan, dış hava sıcaklığı belirli bir eşiğin altına düştüğünde cihazın devreden çıkması sağlanmalıdır. Benzer şekilde, sistem sıcaklığı belirli bir seviyeye ulaştığında ısı pompası otomatik olarak kapatılarak, ısıtma yükünün kazana devredilmesi gerekir. Bu kontrol yaklaşımı, sistemin performans katsayısının (COP) korunmasını ve enerji israfının önlenmesini sağlar. Ayrıca, hibrit sistemlerde zaman programına dayalı çalışma planı oluşturulması önemlidir. Isı pompası ve kazan devreleri, günün saatlerine, dış hava koşullarına veya enerji maliyetlerine göre otomatik olarak devreye alınmalı veya kapatılmalıdır. Bu sayede hem enerji maliyetleri azaltılır hem de sistemin çalışma süreleri optimize edilir.

Tesisatın fiziksel yapısı da kontrol stratejisinde dikkate alınmalıdır. Boru hatlarının uzunlukları ve ısı iletim kayıpları, her devre için farklı offset (denge ayarı) değerleri tanımlanmasını gerektirir. Bu değerler, kontrol sistemine aktarılmalı ve uzaktaki bölgelerdeki sıcaklık farklarını dengeleyerek homojen ısı dağılımı sağlanmalıdır.

1.2.5. Isı Pompası Kullanım Alanları

Isı pompası sistemleri, kullanıcıların ısıtma, soğutma ve sıcak su gereksinimlerini karşılamada farklı yapı türlerinde uygulanabilmektedir. Bu bağlamda büyük ölçekli ticari yapılar olan alışveriş merkezleri, iş merkezleri, bireysel konutlar ve küçük ölçekli yapılar ve stadyumlarda farklı tip kaynaklı ısı pompası yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir (Kurevija, 2016; Mehmet, 2023).



Şekil 18: Isı Pompası Kullanım Alanları

Isı pompası sistemleri, farklı kullanım alanlarına ve ihtiyaçlara göre çeşitlilik göstermektedir. Türkiye gibi ılıman iklime sahip bölgelerde konut uygulamalarında genellikle hava kaynaklı ısı pompası sistemleri tercih edilmektedir. Bununla birlikte, uygulama alanının yakınında kuyu, dere veya deniz suyu gibi kış aylarında donma riski taşımayan bir su kaynağının bulunması durumunda su kaynaklı sistemler de kullanılabilir. Ayrıca, arazinin yeterli yüzey alanına sahip olduğu durumlarda toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri konutlarda alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

İşyeri ve ofislerde ise hem ısıtma hem de soğutma ihtiyacının yoğun olması nedeniyle genellikle yüksek kapasiteli hava kaynaklı sistemler yaygın olarak tercih edilmektedir. Benzer şekilde, yüzme havuzlarının dört mevsim kullanılabilmesi için de çoğunlukla hava kaynaklı ısı pompası sistemlerinden yararlanılmaktadır.

Sanayi tesislerinde, özellikle fabrika uygulamalarında, geniş arazilerden faydalanabilme imkânı ve yüksek kapasite gereksinimi nedeniyle toprak kaynaklı sistemler daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sağlık yapıları olan hastanelerde ise hem ısıtma hem de soğutma

gereksinimlerinin yüksek olması sebebiyle genellikle yüksek kapasiteli hava kaynaklı veya toprak kaynaklı sistemler tercih edilmektedir.

Tarım alanlarında da ısı pompası uygulamalarına rastlanmaktadır. Seralarda ve çiftliklerde genellikle ısıtma amacıyla kullanılan bu sistemlerde, iç mekâna doğrudan sıcak hava sağlayan hava kaynaklı çözümler öne çıkmaktadır (Kurevija, 2016; Mehmet, 2023). Türkiye’de gerçekleştirilen farklı tip ısı pompası uygulamalarına ilişkin örnekler aşağıda verilmiştir.



Şekil 19: Bursa İli Örnek Proje

Bu çalışmada örnek uygulama olarak, Bursa ilinde bulunan 250 m² büyüklüğündeki bir villa projesi ele alınmıştır. Yapıda mahal ısıtma ihtiyacı yerden ısıtma sistemi ile karşılanmakta olup, aynı zamanda kullanım sıcak suyu (KSS) üretimi de aynı sistem tarafından sağlanmaktadır. Bu iki temel ısıtma ve su hazırlama ihtiyacı, hava kaynaklı ısı pompası aracılığıyla karşılanmaktadır. Isı pompasının elektrik enerjisi gereksinimi, sistemde yer alan buffer tankı ile birlikte sıcak suyun depolanması ve artan enerji miktarıyla boyler içerisindeki kullanım suyunun ısıtılması işlemleri, çatıya yerleştirilen fotovoltaik (PV) panellerin ürettiği elektrik enerjisinden karşılanmaktadır.

Sistemin temel çalışma prensibi şu şekildedir: Öncelikle, ısı pompası devrede olduğu sürece PV panellerin öncelikli görevi, ısı pompasının enerji tüketimini karşılamaktır. Isı pompasının enerji ihtiyacı karşılandıktan sonra, öz tüketim oranını artırmak amacıyla sistemdeki buffer tankında bulunan ısıtma suyunun ısıtılması hedeflenmektedir. Ayrıca, yıl boyunca kullanım sıcak suyu ihtiyacının tamamen PV panellerden elde edilen enerjiyle karşılanması amaçlanmıştır. PV panellerin üretimi, öz tüketimden fazla olduğunda, fazla elektrik enerjisi şebekeye verilmekte ve bu sayede üretim–tüketim mahsuplaşması yapılarak, yatırımcının aylık elektrik faturasına önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır. Bu uygulama, ısı pompası sistemlerinin PV panellerle entegrasyonu sayesinde neredeyse sıfır enerji tüketimli, çevreci ve yeşil bina konseptinin başarılı bir örneğini oluşturmaktadır. Ayrıca, PV sisteminin

ısıtmaya sağladığı destek sayesinde ısı pompası cihazlarının çalışma süresi ve devreye girme sıklığı azalmakta, bu da cihazın kullanım ömrünü uzatarak sistem verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 20: Foleya Mountain Resort Otelinde Uygulanan Havadan Suya Isı Pompası Sistemi

Bu çalışma kapsamında ele alınan bir diğer örnek uygulama, Doğu Karadeniz Sıradağları bünyesinde, Trabzon İli, Tonya İlçesi, Kalınçam Köyü, Erikbeli Yaylası mevkiinde, 1650 metre rakımda çam ormanları içerisinde yer alan Foleya Mountain Resort Otel projesidir. Tesis, 70 oda ve 2 adet restoran içeren yüksek konforlu bir dağ otelidir. Projede, daha önce kullanılan merkezi sistem pelet yakıtlı kazanlar devre dışı bırakılarak, çevre dostu ve enerji verimliliği yüksek bir sisteme geçilmiştir. Bu kapsamda otelde havadan suya ısı pompası sistemi uygulanmıştır. Kurulan sistem, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dış ortam sıcaklığında dahi elektrikli ısıtıcı desteği olmadan $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ su çıkış sıcaklığı sağlayabilen yüksek verimli havadan suya ısı pompaları ile donatılmıştır.

Isı pompaları, otelin ısıtma ihtiyacını yerden ısıtma sistemi aracılığıyla karşılamakta; aynı zamanda sistemde kullanılan boylerler yardımıyla kullanım sıcak suyu (KSS) üretimini de sağlamaktadır. Bu bütünleşik yapı sayesinde hem ısıtma hem de kullanım suyu ihtiyacı tek bir entegre sistem üzerinden karşılanmaktadır. Kurulan sistem, uzaktan erişim özelliği sayesinde kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bu sayede oteldeki cihazlar ve sistem bileşenleri çevrimiçi (online) olarak izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Bu kontrol imkânı sayesinde enerji tüketimi optimize edilmekte, gereksiz enerji kayıpları önlenmekte ve istenilen konfor koşullarına hızlı bir şekilde ulaşılabilmektedir.

Proje kapsamında kullanılan havadan suya ısı pompaları, invertör teknolojisi ile maksimum enerji verimliliği sağlamaktadır. Bu cihazlar, 5,05'e varan SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) değerlerine ulaşarak yüksek enerji performansı göstermektedir. Ayrıca tam yükte dahi düşük ses seviyesinde çalışmaları, 65 °C'ye kadar sıcak su üretebilmeleri ve -25 °C dış ortam sıcaklığında tam performansta çalışabilmeleri, sistemi zorlu iklim koşullarında dahi güvenilir ve konforlu hale getirmektedir. Bu proje, konvansiyonel katı yakıt sistemlerinden yenilenebilir enerjiye geçişin başarılı bir örneğini oluşturmakta; aynı zamanda enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve çevre dostu uygulamalar açısından bölgedeki turizm tesislerine örnek teşkil etmektedir.



Şekil 21: TerraCity Alışveriş Merkezinde Uygulanan Yer Altı Suyu Kaynaklı Isı Pompası Sistemi Şeması

Antalya ilinde yer alan TerraCity Alışveriş Merkezi, 48.000 m² kiralanabilir alanı, 180 adet mağaza ve restoranı, çok salonlu sinema kompleksi ve geniş eğlence alanları ile bölgenin en büyük alışveriş merkezlerinden biridir. 2011 yılında hizmete açılan bu yapıda, tamamı yer altı suyu kaynaklı ısı pompası sistemi uygulanmıştır. Bu sistem, yalnızca Türkiye’de değil, Avrupa ölçeğinde de en büyük yer altı su kaynaklı ısı pompası uygulamalarından biri olma özelliğini taşımaktadır.

Yer altı suyu kaynaklı ısı pompası sistemi, yüksek enerji verimliliği ve kararlı performans değerleri sayesinde özellikle Antalya’nın sıcak iklim koşullarında soğutma ve ısıtma yüklerini optimum enerji tüketimiyle karşılamaktadır. Sistem, yıl boyunca kararlı yer altı suyu sıcaklıklarından yararlanarak hem ısıtma hem de soğutma işlevini aynı ekipman üzerinden gerçekleştirmekte, bu sayede mevsimsel enerji dengesini sağlamaktadır. Elde edilen verimlilik sayesinde, TerraCity AVM’nin işletme maliyetleri, bölgedeki benzer alışveriş merkezlerine kıyasla %50-80 oranında daha düşük gerçekleşmektedir. Bu sonuç, sistemin uzun vadede sürdürülebilir enerji kullanımına, işletme ekonomisine ve karbon salınımının azaltılmasına önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.



Şekil 22: Ankara Yüksek Hızlı Tren Garı’nda Uygulanan Su Kaynaklı Isı Pompası ve Free-Cooling Sistemi

Ankara Yüksek Hızlı Tren Garı Projesi, 2013 yılında tasarımına başlanmış ve 2016 yılında hizmete açılmıştır. Proje, Amerikan Yeşil Binalar Derneği (USGBC) tarafından verilen, dünyanın en prestijli yeşil bina sertifikasyonlarından biri olan LEED-GOLD sertifikasına sahiptir. YHT Garı kompleksi; 134 odalı bir otel, 164 adet mağazadan oluşan bir alışveriş

merkezi, 4.500 m² ofis alanı ve 6 adet peron ile 26 adet bilet gişesinden oluşmaktadır. Günlük 50.000 yolcu kapasitesine sahip tesis, 220.000 m² kapalı inşaat alanı, 35.000 m² oturma alanı ve çevre düzenlemesiyle birlikte toplam 70.000 m²'lik bir yerleşim alanına yayılmaktadır.

Yeşil bina kriterleri kapsamında enerji verimliliği, projenin en temel tasarım önceliklerinden biridir. Bu doğrultuda, bina sistemlerinde su kaynaklı ısı pompası sistemleri ve ısı geri kazanımlı sudan suya ısı pompaları tercih edilmiştir. Bu sistemler sayesinde, binanın ısıtma ve soğutma yükleri yüksek verimlilikle karşılanmaktadır. Yapılan enerji simülasyonu sonucunda, Amerikan standartlarına uygun olarak oluşturulan referans bina ile karşılaştırıldığında, Ankara YHT Garı'nın enerji tüketiminin %15 daha verimli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, havalandırma sistemlerinden verilen havanın standartlara göre %30 daha temiz olduğu da kanıtlanmıştır. Projede kullanılan su soğutmalı "heat pump" paket klima sistemleri, kondenser hattında atık enerjinin geri kazanımı ile yüksek oranda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle yoğun yolcu ve ziyaretçi trafiği nedeniyle taze hava ihtiyacı yüksek olan bina, otomatik taze hava kontrol sistemleri sayesinde iç mekândaki kişi sayısına göre havalandırma oranını dinamik olarak ayarlamaktadır. Bu sistem, hem konfor koşullarını korumakta hem de gereksiz enerji tüketimini önlemektedir.

Projede kullanılan kapalı devre soğutma kulelerinde, yüksek enerji verimliliği sağlayan kuru soğutma (free-cooling) teknolojisi uygulanmıştır. Bu teknoloji sayesinde, özellikle kış aylarında dahi soğutma ihtiyacı olan alanlarda, soğutma kapasitesinin tamamı free-cooling modunda karşılanabilmektedir. Bu sayede mekanik soğutucu ekipmanların enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılmış ve sistemin genel verimliliği artırılmıştır.

Projenin dikkat çeken bir diğer özelliği ise yağmur suyu toplama ve geri kazanım sistemidir. Çatıya düşen yağmur suları, her biri 240 ton kapasiteli iki adet depoda toplanmakta ve filtrasyon işleminden geçirildikten sonra hem peyzaj sulamasında hem de klozet rezervuarlarında yeniden kullanılmaktadır. Bu sayede, standart bir binaya oranla %56 oranında su tasarrufu sağlanmıştır.

Ayrıca, doğal gün ışığından maksimum düzeyde yararlanmak amacıyla çatı tasarımında geniş ışıklık alanları bırakılmıştır. Bina genelinde kullanılan civa içermeyen aydınlatma armatürleri, otomasyon sistemi ile entegre çalışmakta; bu sayede gün ışığı miktarına bağlı olarak aydınlatma seviyeleri otomatik olarak ayarlanmakta, gün içinde daha az enerji tüketimi sağlanmaktadır. Bu uygulama, aydınlatma kaynaklı enerji tüketimini minimize ederek, projenin genel enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 23: Düzce Çiftlik Projesinde Uygulanan Toprak Kaynaklı Altı Borulu Sudan Suyu Isı Pompası

Bu uygulama örneği, Düzce ilinde 32.155 m² alan üzerine kurulu özel bir çiftlik projesidir. Proje, bir aile ve yakınlarının kullanımına yönelik olarak tasarlanmış olup; ana bina, iki adet personel evi, garaj, tavla, jakuzi, odun fırını ve kapsamlı bir çevre düzenlemesi içermektedir. Projenin enerji sistemi, toprak kaynaklı 6 borulu sudan suya ısı pompası sistemi üzerine kurgulanmıştır. Bu sistem aracılığıyla yapının ısıtma, soğutma ve kullanım sıcak suyu (KSS) ihtiyacı karşılanmaktadır. Isıtma modunda sistem 60/55 °C sıcak su, soğutma modunda ise 7/12 °C soğuk su üretmektedir. Kullanılan altı borulu sudan suya ısı pompası, aynı anda bağımsız sıcak ve soğuk su üretimi yapabilme özelliğine sahiptir. Bu sayede farklı bölgelerdeki ısıtma ve soğutma ihtiyaçları eş zamanlı olarak karşılanabilmektedir. Sistemin en dikkat çekici özelliği, %100'e yakın ısı geri kazanım kabiliyetidir. Isıtma ve soğutma işlemlerinin aynı anda gerçekleştiği dönemlerde, sistem kendi içinde enerji geri kazanımı sağlayarak, bir bölgede oluşan atık ısıyı diğer bölgenin enerji ihtiyacında kullanmaktadır. Böylece “bedava

ısıtma/soğutma” olarak tanımlanabilecek yüksek verimli bir enerji dönüşümü elde edilmektedir. Bu uygulama, yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum kullanımı ve yüksek enerji verimliliği açısından dikkat çekici bir örnek olup, aynı zamanda konfor, çevre dostu işletme ve düşük enerji maliyeti hedeflerini bir arada sunmaktadır.



Şekil 24: Ankara Karacaoğlan Villa Projesinde Uygulanan Toprak Kaynaklı Isı Pompası ve Pv-Hibrit

Bu örnek uygulama, Ankara ili Karacaoğlan bölgesinde bulunan, 350 m² kullanım alanına sahip bir villa projesidir. Projede, yüksek enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanmak amacıyla hibrit bir sistem tasarımı uygulanmıştır. Sistemin ana bileşenleri arasında 17 kW kapasiteli toprak kaynaklı ısı pompası ve 5 kWp gücünde fotovoltaik (PV) panel sistemi bulunmaktadır. Isı pompasının enerji kaynağı olarak kullanılacak toprak devresi için, yaklaşık 500 m²'lik bir alanda, yerin yaklaşık 2 metre derinliğinde kazılar yapılarak ısı değişim boruları döşenmiştir. Bu sayede topraktan kararlı sıcaklıkta enerji elde edilerek ısı pompası beslenmiştir.

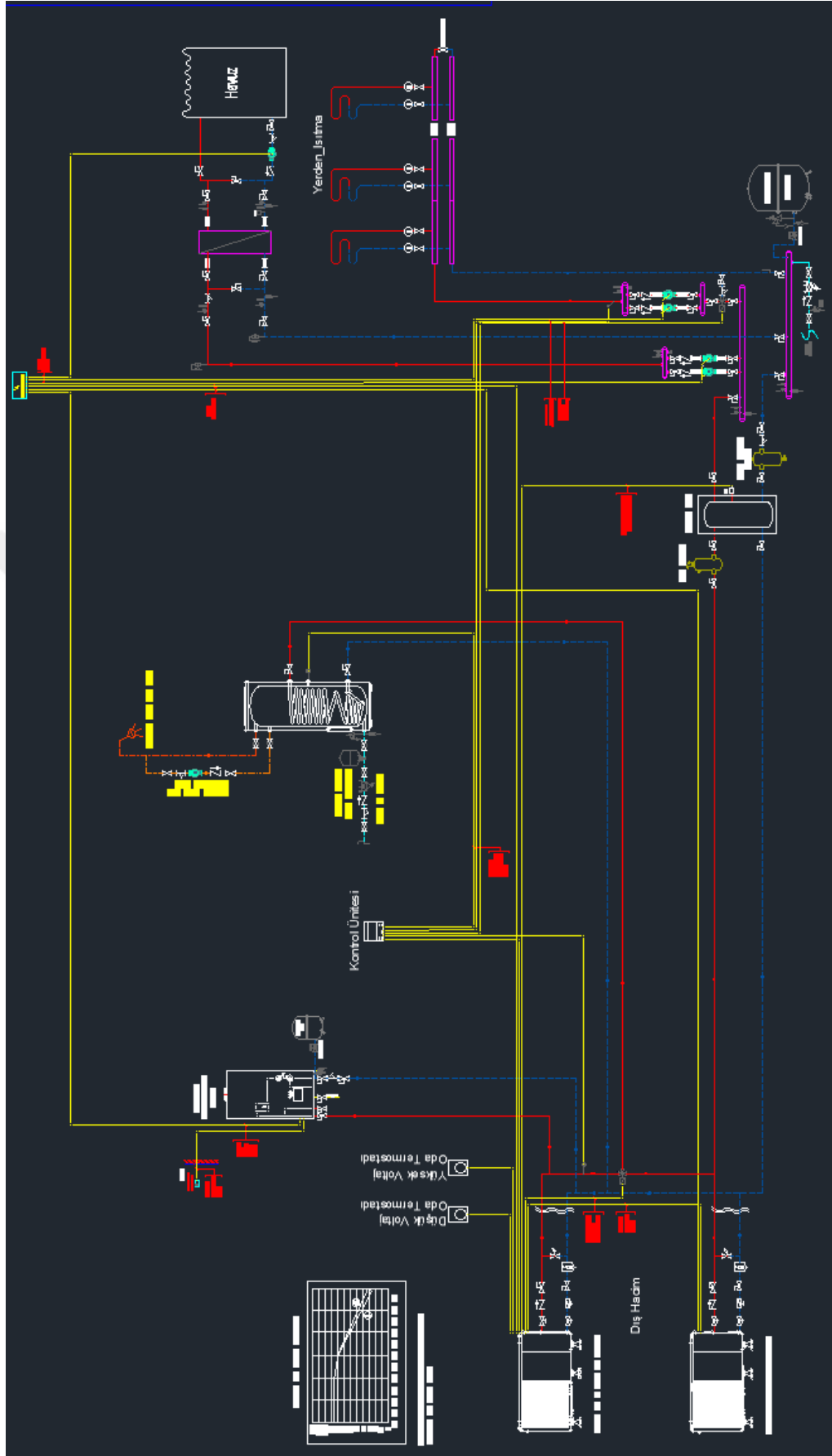
Proje, PV panellerden üretilen elektrik enerjisinin öz tüketim oranını artırmaya yönelik olarak tasarlanmıştır. Sistem tasarımı, ısı pompasının çalışması, kullanım sıcak suyu (KSS)

retimi ve mahal ısıtma/soğutma taleplerine göre optimize edilmiştir. Üretilen elektrik enerjisinin ihtiyaç fazlası kısmı, PV-hibrit batarya sistemlerinde depolanmaktadır.

Depolanan enerji, ilerleyen dönemlerde evin elektrik tüketiminde yeniden kullanılmakta, böylece şebeke bağımlılığı azaltılmakta ve yenilenebilir enerji kullanım oranı artırılmaktadır. Kış aylarında mahal ısıtması, topraktan alınan ısı enerjisinin ısı pompası aracılığıyla yükseltilmesiyle sağılanmaktadır. Yaz aylarında ise, doğıal soğutma (free cooling) prensibine dayalı olarak sistem yalnızca topraktan alınan ısının çekilmesi yoluyla mahal soğutmasını gerçekleştirmektedir. Proje, soğuk iklim bölgesinde yer aldığından, toprak kaynaklı ısı pompası kullanımı ile sistemin dış hava koşullarından etkilenmesi nlenmiř, bu sayede yıl boyunca sabit performans ve yüksek enerji verimliliğı elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu proje yenilenebilir enerji destekli hibrit ısı pompası uygulamalarının başarılı örneklerinden biri olup, çevreci, sürdürülebilir ve enerji tasarruflu bir iklimlendirme çözümü olarak dikkat çekmektedir.



şekil 25: Ankara Hibrit Isıtmaya Sahip Konut Binası



Şekil 26: Ankara Konut Binası Hibrit Isıtma Soğutma Sistemi

Şekilde, Ankara’da bir konut binasında uygulanan hibrit ısıtma ve soğutma sisteminin detaylı uygulama şeması gösterilmektedir. Bu sistem, iki adet ısı pompası (master–slave) ile çalışmakta olup, kullanım sıcak suyu (DHW), havuz ısıtması ve mahal ısıtma-soğutma (yerden ısıtma) ihtiyaçlarını aynı anda karşılayabilen entegre bir yapıya sahiptir. Isı pompalarından elde edilen enerji, kontrol ünitesi aracılığıyla farklı devrelere yönlendirilmektedir. DHW devresi, boyler içerisindeki serpantin aracılığıyla kullanım sıcak suyunu hazırlarken; havuz devresi plakalı ısı eşanjörü (PHE) üzerinden ısı transferi gerçekleştirir. Mahal ısıtma hattı ise denge tankı (buffer tank) yardımıyla düşük sıcaklıklı suyun dağıtımını sağlar. Sistemde sıcaklık sensörleri, kontrol vanaları ve sirkülasyon pompaları aracılığıyla akış kontrolü otomatik olarak yapılmaktadır. Bu sayede sistem, farklı kullanım alanları arasında enerji paylaşımını optimize etmekte ve mevsimsel yük değişimlerine uyum sağlayarak yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Uygulanan bu hibrit sistem, Ankara iklim koşullarında hem enerji tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından etkili bir çözüm sunmaktadır.

1.2.5.1. Isı pompalarının faydaları

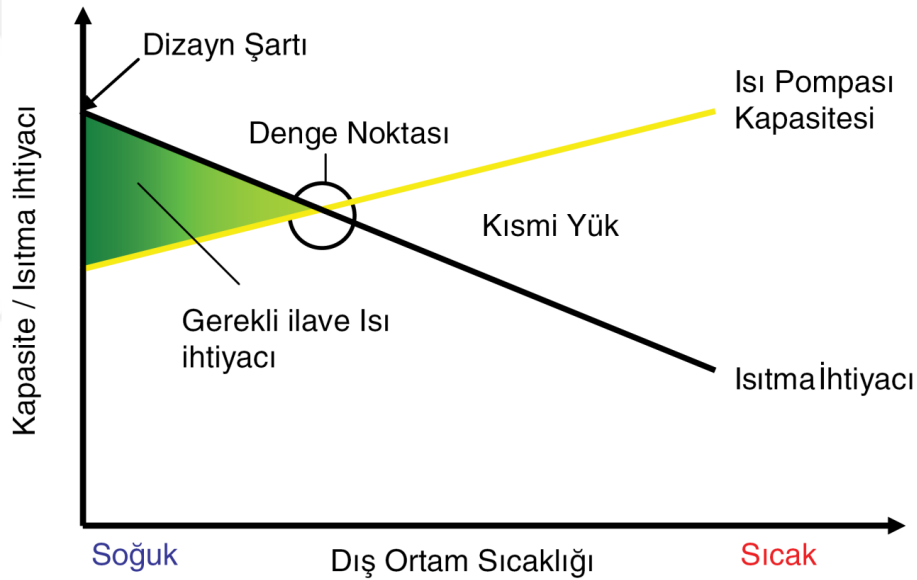
- Isı pompalarının en önemli avantajlarından biri enerji verimliliği sağlamalarıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte, hava kaynaklı bir ısı pompası kullanılarak bir birim elektrik enerjisi ile beş birim ısıtma enerjisi elde edilebilmekte, bu da sistemin yüksek performans katsayısı (COP=5) ile çalışabileceğini göstermektedir.
- Enerji verimliliğinin yanı sıra, ısı pompaları ekonomik açıdan da avantajlıdır. İşletme giderlerinin düşük olması, bakım ve servis gereksinimlerinin diğer sistemlere kıyasla daha az olması, bu teknolojiyi kısa sürede kendini amorti eden kârlı bir yatırım haline getirmektedir.
- Bir diğer önemli özellik, ısı pompalarının güvenli olmasıdır. Çalışma prensibinde yanma olayı gerçekleşmediğinden, patlama, yangın ya da zehirlenme gibi riskler söz konusu değildir. Bu durum, özellikle konutlarda ve toplu yaşam alanlarında tercih edilebilirliğini artırmaktadır.
- Isı pompaları aynı zamanda teknolojik gelişmelere açık sistemlerdir. Kompresör teknolojilerindeki ilerlemeler ve çevre dostu soğutucu akışkanların geliştirilmesi sayesinde sürekli daha yüksek verimlilik değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, güneş kolektörleri ile entegre edildiğinde hem sıcak su ısıtma hem de ortam ısıtma desteği sağlayarak hibrit çözümler sunabilmektedir.
- Fosil yakıt kullanımına ihtiyaç duymamaları, ısı pompalarının çevresel açıdan en önemli avantajlarından biridir. Bu yönüyle sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedirler. Kullanım sırasında herhangi bir gaz, duman, cüruf ya da koku salınımı

gerçekleşmez. Sadece elektrik enerjisinin üretildiği santrallerde oluşan CO₂ salımı söz konusudur. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte çalıştırıldığında bu emisyon minimuma indirilebilmekte, hatta sıfır seviyesine ulaşabilmektedir.

- Isı pompaları mimari uyumluluk ve estetik avantajlar da sunmaktadır. Kompakt yapıları sayesinde farklı kullanım şekillerine adapte edilebilir, bina kabuğu ile uyumlu olacak şekilde tasarlanarak görüntü kirliliği oluşturmada uygulanabilirler (İskid, 2024).

Isı pompaları seçimi

Isı pompası sistemlerinin doğru seçimi, sistemin enerji verimliliği, konfor koşulları ve işletme maliyetleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu kapsamda, ısıtma ve soğutma yüklerinin doğru hesaplanması, sistem performansının optimize edilmesi için temel bir gerekliliktir. Şekil 27’de, dış ortam sıcaklığına bağlı olarak sistemin ısıtma kapasitesi ile yapı ısı ihtiyacının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 27: Isı Pompası Kapasitesi ile Isıtma İhtiyacının Dış Ortam Sıcaklığına Göre Değişimi

Şekilde ısıtma ihtiyacı dış ortam sıcaklığı azaldıkça artmakta, buna karşılık ısı pompası kapasitesi ise düşük dış ortam sıcaklıklarında azalmaktadır. Bu iki eğrinin kesiştiği nokta, denge noktası olarak adlandırılır. Denge noktası, ısı pompasının kapasitesinin bina ısıtma yükünü tam olarak karşıladığı dış hava sıcaklığı değerini ifade eder. Bu sıcaklığın altındaki koşullarda, ısı pompası tek başına yeterli olmayacağından ilave ısı kaynağı devreye girer. Bu ilave ısı kaynağı genellikle elektrikli rezistans, kazan ya da hibrit sistemlerdeki alternatif bir ısıtma ünitesi olabilir.

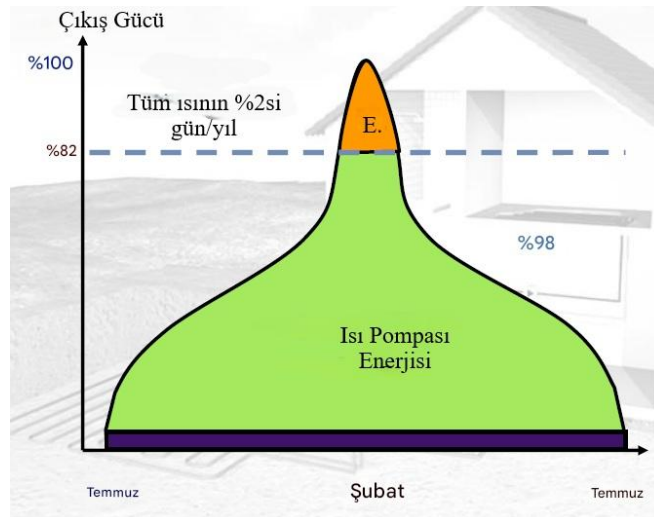
Denge noktası belirlenirken sistemin dizayn şartı da dikkate alınmalıdır. Dizayn şartı, sistemin en düşük dış hava sıcaklığında dahi iç ortam konfor şartlarını sağlayabilmesi için

gereken maksimum ısıtma kapasitesidir. Ancak ısı pompası, genellikle bu en düşük sıcaklıkta değil, daha ekonomik bir denge sıcaklığında boyutlandırılır. Böylece cihaz yılın büyük bir bölümünde yüksek verimle çalışabilir.

Isı pompası seçim süreci genel olarak şu aşamalardan oluşur:

- Isıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması: Yapının konumu, yalıtım durumu, iç kazançlar ve iklim koşulları dikkate alınarak toplam ısıtma-soğutma ihtiyacının belirlenmesi.
- Sistem su sıcaklığının belirlenmesi: Isı pompasının çalışacağı su sıcaklıkları, sistemin COP değerini ve kapasitesini doğrudan etkiler.
- Isı pompası işletim sisteminin belirlenmesi: Tek kademeli, inverter kontrollü ya da hibrit işletim yapısının seçimi.
- Isı pompası tipinin seçilmesi: Split, monoblok, hava-su veya su-su tipi sistem alternatifleri arasından uygun olanın belirlenmesi.
- Denge noktasının tespiti: Cihaz kapasitesi ile ısıtma yükü eğrilerinin kesişim noktası dikkate alınarak, sistemin ilave ısı gereksiniminin hangi sıcaklıklarda ortaya çıkacağını hesaplanması.

Bu süreç sonunda seçilen ısı pompası, tasarım şartlarını karşılayacak şekilde boyutlandırılır. Böylece sistem, denge noktası üzerinde kalan sıcaklıklarda yüksek verimle çalışırken, altındaki sıcaklıklarda ilave ısı kaynağı devreye girerek konfor şartlarının sürekliliğini sağlar.



Şekil 28: Isı Pompası Enerji Gereksinimi ve Yardımcı Isıtma İhtiyacının Yıl İçindeki Dağılımı

Grafığe göre, ısı pompası yıl boyunca toplam ısıtma yükünün yaklaşık %98'ini karşılamakta, yalnızca yılın %2'lik kısa bir döneminde (en düşük dış hava sıcaklıklarının

yaşandığı kış günlerinde, örneğin Şubat ayında) ek ısı kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bu kısa süreli ek ısı ihtiyacı, sistemin genel enerji tüketimi ve verimliliği üzerinde oldukça sınırlı bir etki yaratır. Dolayısıyla sistemin maksimum ısıtma kapasitesine göre değil, yılın büyük çoğunluğunda geçerli olan ortalama yük koşullarına göre boyutlandırılması daha rasyoneldir. Bu yaklaşım, seçilen cihaz ve sistem çaplarının yaklaşık %20 oranında küçültülmesini mümkün kılar. Böylece hem ilk yatırım maliyetleri azalır hem de daha küçük kapasiteli cihazlar yılın büyük kısmında yüksek verimlilikte ve düşük enerji tüketimiyle çalışabilir. Kısacası, ısı pompası yılın %98'inde etkin şekilde çalışmakta, maksimum kapasiteye yalnızca %2'lik kısa süreli bir zaman diliminde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, sistemin ekonomik boyutlandırma, enerji tasarrufu ve işletme verimliliği açısından optimum bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

1.2.6. Dünyada Isı Pompası

Isı pompası teknolojisi, özellikle karbonsuzlaştırma çalışmaları ve enerji verimliliği alanındaki gelişmeler bağlamında, sürdürülebilir enerji sistemlerine doğru küresel geçişte önemli bir aktör olarak ortaya çıkmıştır. Küresel ısı pompası kullanımı manzarası; artan enerji verimliliği talepleri, teknolojik gelişmeler ve çevresel kaygılarla desteklenen önemli gelişmelere tanıklık etmektedir. Nehirlerden, yer altı kaynaklarından ve endüstriyel atıklardan enerji kullanan çeşitli ısı pompası teknolojilerinin entegrasyonu yoluyla dünya çapında yılda yaklaşık 1 milyar gigakalori (Gcal) ısı üretildiği tahmin edilmektedir ve bu durum, ısı pompalarının sürdürülebilir enerji üretimindeki kritik rolünü göstermektedir (Ilyin vd., 2020).

Isı pompalarının benimsenmesi, öncelikle geleneksel ısıtma sistemlerine düşük karbonlu alternatiflere duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Küresel enerji krizinin (2021-2022) ardından bu sistemlerin uygulanması hızlanmış, mevcut altyapıya entegre edildiğinde hem enerji tasarrufu sağladıkları hem de sera gazı emisyonlarını azalttıkları görülmüştür (Basok vd., 2023). Bu durum özellikle konut uygulamalarında belirgindir; ısı pompaları, geleneksel kazanlara göre çok daha düşük CO₂ emisyonlarına yol açmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır (Choi vd., 2014).

Çeşitli çalışmalarda, ısı pompalarının enerji verimliliği ve karbon azaltımı açısından sağladığı katkılar vurgulanmaktadır. Ilıman bölgelerde hava kaynaklı ve toprak kaynaklı sistemler CO₂ emisyonlarında önemli azalmalar sağlarken (Andrew vd., 2024; Doak vd., 2022), soğuk iklimlerde yapılan araştırmalar, uyarlanmış sistemlerin 1,8 ile 5,6 arasında değişen mevsimsel performans faktörlerine (SPF) ulaşabildiğini ortaya koymuştur (Valančius vd., 2019). Yer kaynaklı sistemlerin özellikle enerji verimliliğinin kritik olduğu soğuk bölgelerde

hava kaynaklı sistemlerden daha iyi performans gösterdiği de raporlanmıştır (Želazna vd., 2024; Fasci, 2022).

Ekonomik uygulanabilirlik, ısı pompası yaygınlaşmasında en önemli faktörlerden biridir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olsa da, enerji tasarrufu ve devlet teşvikleri yatırımın geri dönüşünü olumlu hale getirebilmektedir (Murano vd., 2024; Guo, 2024). Hibrit kurulumlar, yani mevcut kazan sistemleriyle entegrasyon, maliyet etkinliğini artırmaktadır (Vo ve Nguyen, 2024). Ayrıca, yapılan bir çalışmada ABD hanelerinin yaklaşık %32'sinin belirli ekonomik koşullar altında ısı pompası kullanımından finansal fayda sağladığı tespit edilmiştir (Deetjen vd., 2021). Bununla birlikte, yüksek ön maliyetler ve değişken iklim koşulları, özellikle Kuzey Amerika'da daha geniş bir benimsemeyi sınırlamaya devam etmektedir (Andrew vd., 2024; Dosumu vd., 2024).

Isı pompaları yalnızca konut sektöründe değil, aynı zamanda endüstriyel ve tarımsal uygulamalarda da giderek daha fazla kullanılmaktadır. Tarım ve hayvancılıkta enerji verimliliğini artırmada etkili oldukları ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sundukları ortaya konmuştur (Han vd., 2024; Pavlenok vd., 2020; Paziuk vd., 2024). Avrupa'da ise bölgesel ısıtma sistemlerinde ısı pompalarının yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, karbonsuzlaştırma stratejilerinde bu teknolojinin rolünü güçlendirmektedir (Pastore vd., 2024). Ayrıca, çevresel değerlendirmeler, jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla çalışan ısı pompalarının daha dirençli bir enerji ekonomisine katkıda bulunduğunu göstermektedir (Doak vd., 2022; Ban & Bungău, 2022; Su vd., 2020).

1.2.6.1. Avrupa'da ısı pompası kullanımı

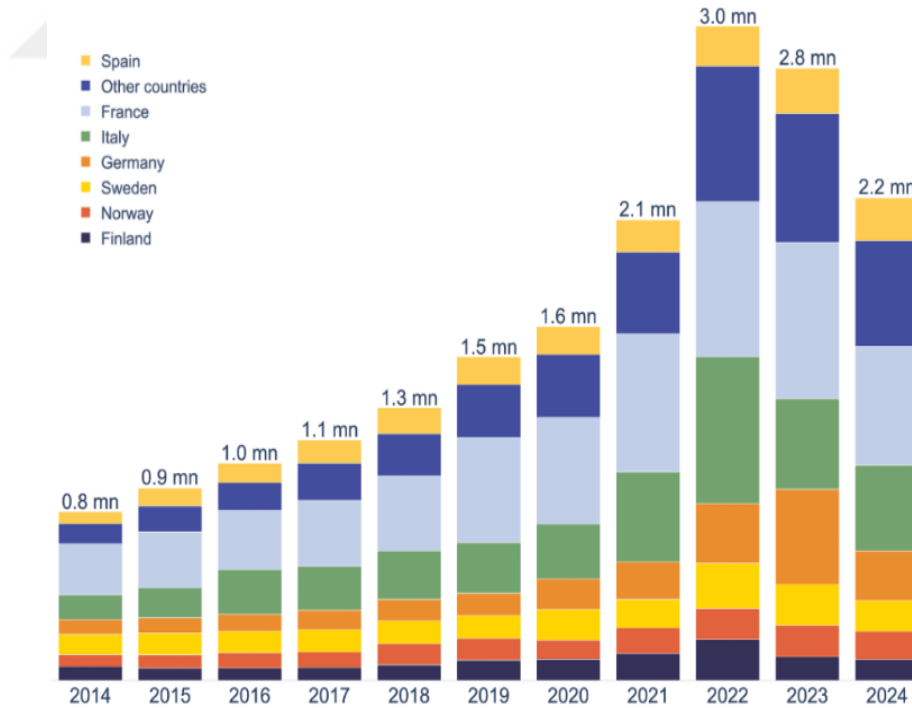
Avrupa'da ısı pompalarının yaygınlaşması, büyük ölçüde hem ısıtma hem de soğutma uygulamalarında sağladıkları yüksek verimlilikten kaynaklanmaktadır. Özellikle Kuzey Avrupa ülkeleri, bu teknolojinin benimsenmesinde öncü konumdadır. Norveç'teki konutların yaklaşık %60'ı ısı pompalarıyla donatılmışken, İsveç ve Finlandiya'da bu oran %40'ın, Estonya'da ise %30'un üzerindedir (Hart-Davis vd., 2024; Hart-Davis vd., 2023). Bu yüksek kullanım oranı, fosil yakıtlardan uzaklaşma sürecinde sürdürülebilir ısıtma çözümlerine duyulan ihtiyacın somut bir göstergesidir.

Kuzey Avrupa ülkelerinin yanı sıra, Güney Avrupa'da İtalya, Fransa ve İspanya da ısı pompası uygulamalarında öne çıkmaktadır. 2017 yılı itibarıyla Avrupa'daki toplam kurulumların yaklaşık %83'ü bu ülkelerde gerçekleştirilmiştir (Krawczyk vd., 2019). Özellikle İtalya'da uygulamaya konulan *Superbonus* programı, enerji verimliliği yatırımlarına %110'a

varan vergi indirimi sunarak ısı pompası pazarının hızlı büyümesine katkıda bulunmuştur (Schio vd., 2022). Bu büyüme eğilimi, artan enerji verimliliği hedefleri, çevresel kaygılar ve hükümet teşvikleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Rosenow vd., 2022).

Avrupa genelinde ise 2022 yılı itibarıyla 20 milyondan fazla kurulu ısı pompası bulunmaktadır. Bu artış, konutlardaki ısınma talebiyle doğrudan örtüşmekte ve enerji dönüşümü hedefleriyle paralel ilerlemektedir (Kurevija vd., 2023). Almanya, 2030 yılına kadar yaklaşık altı milyon yeni ünitenin kurulmasını planlayarak bu alandaki kararlılığını ortaya koymaktadır (Murano vd., 2024; Döllen & Schlüter, 2024). Bu gelişmeler, Avrupa enerji politikalarının yenilenebilir ve düşük karbonlu çözümlerle giderek daha uyumlu hale geldiğini göstermektedir.

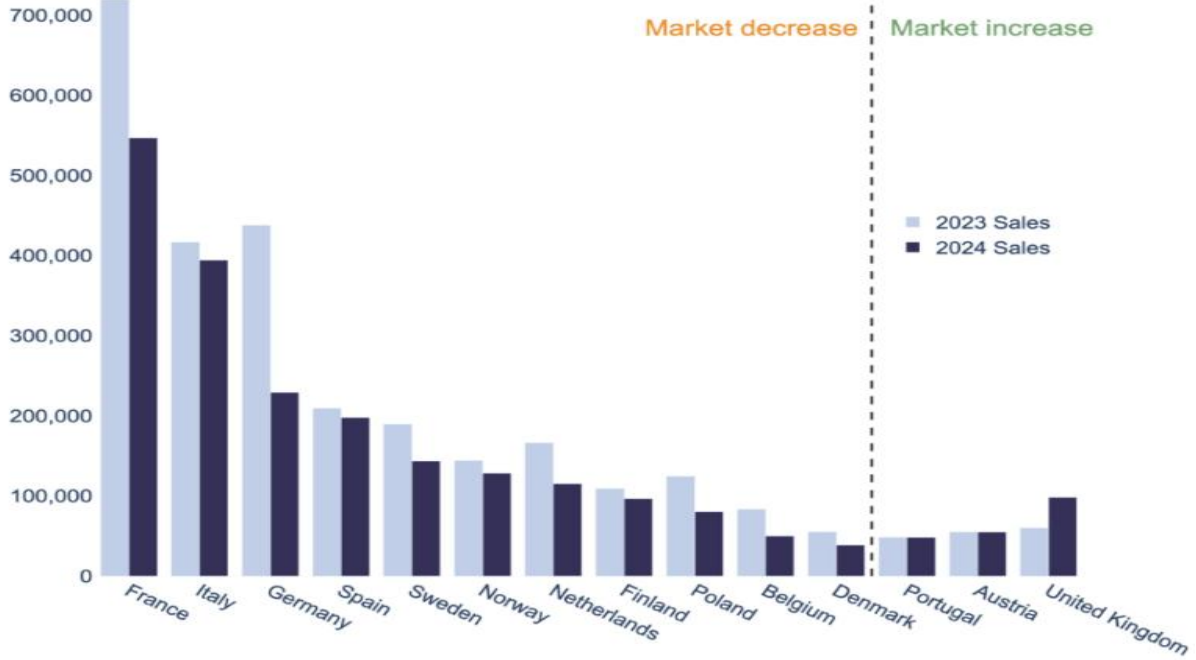
Teknolojik tercihler açısından yapılan incelemeler, yer kaynaklı ısı pompalarının (GSHP) özellikle daha soğuk iklimlerde, hava kaynaklı sistemlere kıyasla daha yüksek performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Sürekli ısınma talebinin bulunduğu bölgelerde bu sistemlerin uygulanabilirliği daha güçlü görülmektedir (Ishihara vd., 2018). Isı pompalarının sunduğu faydalar konusunda artan farkındalık, bu teknolojilerin daha fazla ülkenin bina stratejilerine entegre edilmesine zemin hazırlamaktadır (Aquino vd., 2021).



Şekil 29: Avrupa Ülkelerinin 2014-2024 Isı Pompası Satış Oranları

Avrupa’da ısı pompası pazarı son yıllarda kayda değer bir büyüme göstermiş olsa da, 2024 yılı itibarıyla önemli bir yavaşlama dikkat çekmektedir. Geçtiğimiz yıl, Avrupa pazarının

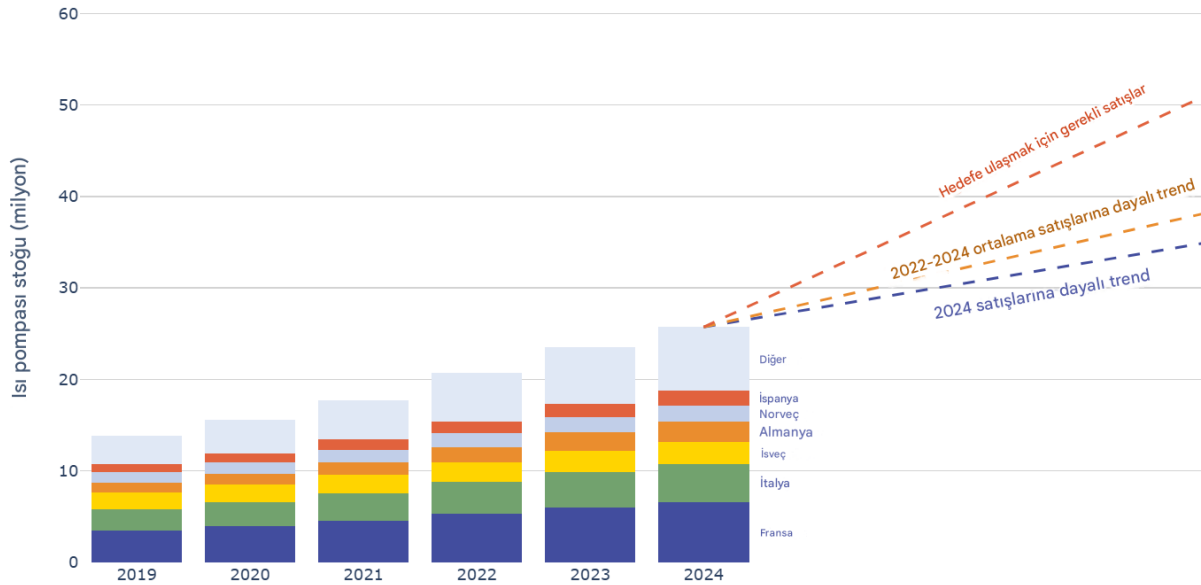
yaklaşık %90'ını oluşturan 14 ülkede ısı pompası satışları 2023 yılına kıyasla %21 oranında azalmıştır. Satış rakamları incelendiğinde, 2023 yılında 2,8 milyon adet olan kurulum sayısı 2024 yılında 2,2 milyona gerilemiştir. Bu gelişme, ısıtma pazarının fosil yakıtlardan ısı pompalarına geçiş sürecini yavaşlatan kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 30: 2023 ve 2024 Yılları Arasında Avrupa Ülkelerinde Isı Pompası Satışlarının Karşılaştırması

Şekilde verilen bu grafik incelendiğinde grafiğin sol tarafında yer alan ülkelerde (örneğin Fransa, İtalya, Almanya, İspanya, İsveç) 2024 yılında satışların 2023'e kıyasla azaldığı, yani pazarın daraldığı görülmektedir. Bu durum, grafikte “Market decrease (Pazar daralması)” olarak belirtilmiştir. Özellikle Fransa’da satışlar 2023’te yaklaşık 700.000 adet seviyesindeyken, 2024’te yaklaşık 550.000 adede gerilemiştir. Benzer şekilde İtalya ve Almanya’da da satışlarda düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Buna karşılık, grafiğin sağ kısmında yer alan ülkelerde (Portekiz, Avusturya, Birleşik Krallık) satışların 2024 yılında artış gösterdiği ve pazarın büyüme eğiliminde olduğu görülmektedir. Özellikle Birleşik Krallık, 2024 yılında belirgin bir satış artışı kaydetmiş ve Avrupa genelinde ısı pompası pazarında yükselen bir ülke konumuna gelmiştir. Genel olarak, 2024 yılı itibarıyla Avrupa ısı pompası pazarında bölgesel farklılıkların arttığı görülmektedir. Batı ve Kuzey Avrupa ülkelerinde satışlarda görece durgunluk veya azalma, buna karşın bazı Orta ve Güney Avrupa ülkelerinde büyüme eğilimi dikkat çekmektedir. Bu durum, ülkelerin enerji politikalarındaki değişiklikler, teşvik mekanizmaları, enerji fiyatları ve konut yenileme programları gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir.

Söz konusu gerilemenin başlıca üç temel nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, hükümetlerin ısı pompalarına yönelik destek ve teşvik planlarında yaptıkları değişiklikler, tüketici güvenini zedelemiş ve yatırımları erteleme eğilimini artırmıştır. İkinci olarak, yaşam maliyetlerindeki artışla birlikte Avrupa genelinde yaşanan ekonomik durgunluk, hane halklarının büyük ölçekli enerji yatırımlarına olan ilgisini azaltmıştır. Üçüncü olarak ise, sübvansiyonlarla düşük seviyede tutulan doğal gaz fiyatları, ısı pompalarıyla rekabet eden geleneksel ısıtma sistemlerini kısa vadede daha cazip hale getirmiştir. Bu faktörlerin bir araya gelmesi, Avrupa ısıtma pazarının karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşma sürecinde beklenmeyen bir yavaşlamaya yol açmıştır. Farklı iklim bölgelerinde ısı pompalarının benimsenmesi, ülkelerin sürdürülebilir ve düşük karbonlu ısıtma çözümlerine ulaşma çabalarının bir parçası olarak öne çıkmaktadır. Yerel konut ihtiyaçlarını karşılamasının yanı sıra, enerji yönetimi stratejileriyle uyum sağlaması ısı pompalarını Avrupa'nın enerji politikalarında kritik bir araç haline getirmektedir. Aşağıda 2030 yılına kadar Avrupa ülkelerinin ısı pompası artış hedeflerini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 31: Avrupa’da Isı Pompası Stoklarının Güncel Büyümesi ve 2030 Hedefi Karşılaştırması

Şekilde Avrupa Birliği üye ülkelerinde 2019-2024 yılları arasında gerçekleşen ısı pompası stok artışları ile 2030 yılına yönelik hedef arasındaki fark karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafik, Fransa, İtalya, İsveç, Almanya, Norveç, İspanya ve diğer Avrupa ülkelerine ait kümülatif ısı pompası stoklarını (milyon adet) yıllar bazında sunmaktadır.

Grafığe göre, ısı pompası stoğu 2019 yılında yaklaşık 13 milyon düzeyindeyken, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 26 milyon seviyesine ulaşmıştır. Bu artış eğilimi, son yıllarda enerji

dönüşümü politikalarının etkisiyle hızlanmış olsa da, 2030 yılına kadar Avrupa Birliği'nin öngördüğü yaklaşık 50 milyon adetlik hedefin altında kalma riski bulunmaktadır.

Grafikte yer alan kesik çizgiler, farklı büyüme senaryolarını temsil etmektedir:

- Kırmızı kesik çizgi ("Needed sales to reach target"), 2030 yılı hedefinin yakalanabilmesi için gerekli satış hacmini göstermektedir.
- Turuncu kesik çizgi ("Trend based on 2022-2024 average sales"), 2022-2024 yılları arasındaki ortalama satış hızının korunması durumunda beklenen eğilimi ifade etmektedir.
- Mavi kesik çizgi ("Trend based on 2024 sales") ise 2024 yılındaki satış seviyesinin sabit kalması halinde ortaya çıkacak öngörülen stok artışını göstermektedir.

Bu eğilimler birlikte değerlendirildiğinde, mevcut satış hacimlerinin sürdürülmesi durumunda Avrupa'daki toplam ısı pompası stoğunun 2030 yılı hedefinden yaklaşık 20 milyon adet daha düşük olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla, hedeflenen karbonsuzlaşma senaryosuna ulaşılabilmesi için ısı pompası pazarında satışların ve kurulum oranlarının belirgin biçimde artırılması gerekmektedir.

1.2.6.2. Türkiye'nin yeşil dönüşümdeki hedefleri

Türkiye, 2021 yılında yayımlanan Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile çevresel, ekonomik ve sosyal kalkınmayı bütüncül biçimde ele alan bir yeşil dönüşüm stratejisi benimsemiştir. Bu plan, Avrupa Yeşil Mutabakatı'na uyum sağlamak ve sürdürülebilir büyümeyi desteklemek amacıyla hazırlanmıştır. Türkiye'nin yeşil dönüşüm sürecindeki başlıca hedefler şu şekildedir:

Sınırdan Karbon Düzenlemeleri: İhracatın karbon yoğunluğunu azaltmak, uluslararası ticarete karbon vergisi uygulamalarına uyum sağlamak ve üretim süreçlerinde düşük karbonlu teknolojilerin kullanımını yaygınlaştırmak hedeflenmiştir.

Yeşil ve Döngüsel Bir Ekonomi: Kaynak verimliliğinin artırılması, atık miktarının azaltılması, geri dönüşümün desteklenmesi ve döngüsel ekonomi modeline geçiş öncelikli hedefler arasında yer almıştır.

Yeşil Finansman: Yeşil tahvil, sürdürülebilir kredi ve çevre dostu yatırım araçlarıyla özel sektörün yeşil yatırımlara yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda finansal sistemin sürdürülebilir yatırımları desteklemesi hedeflenmiştir.

Temiz, Ekonomik ve Güvenli Enerji Arzı: Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması, enerji verimliliğinin geliştirilmesi ve enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Böylece dışa bağımlılığın azaltılması planlanmıştır.

Sürdürülebilir Tarım: Tarımsal üretimde çevre dostu yöntemlerin benimsenmesi, su ve toprak kaynaklarının korunması, iklim değişikliğine dayanıklı üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve gıda güvenliğinin sağlanması amaçlanmıştır.

Sürdürülebilir ve Akıllı Ulaşım: Elektrikli araçların, akıllı ulaşım sistemlerinin ve alternatif yakıt teknolojilerinin yaygınlaştırılması, ulaşımda karbon salımının azaltılması hedeflenmiştir.

İklim Değişikliği ile Mücadele Diploması: Türkiye'nin uluslararası iklim anlaşmalarına uyumlu hareket etmesi, iklim değişikliğiyle mücadelede aktif diplomasi yürütmesi ve düşük karbonlu kalkınma hedeflerine yönelik politika geliştirmesi planlanmıştır.

Bilgilendirme ve Bilinçlendirme Faaliyetleri: Toplum genelinde çevre bilincinin artırılması, sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının kazandırılması ve yeşil dönüşüm sürecine vatandaş katılımının teşvik edilmesi amaçlanmıştır.

Bu hedefler, Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021) çerçevesinde 2053 yılı net sıfır emisyon vizyonuna ulaşılması için belirlenen stratejik önceliklerdir. Ayrıca Türkiye'de Isı Pompası potansiyelinin tespiti amacıyla Dünya Bankası destekli Isı Pompası Piyasası Değerlendirme Projesi geliştirilmiştir. Yapılan proje ile;

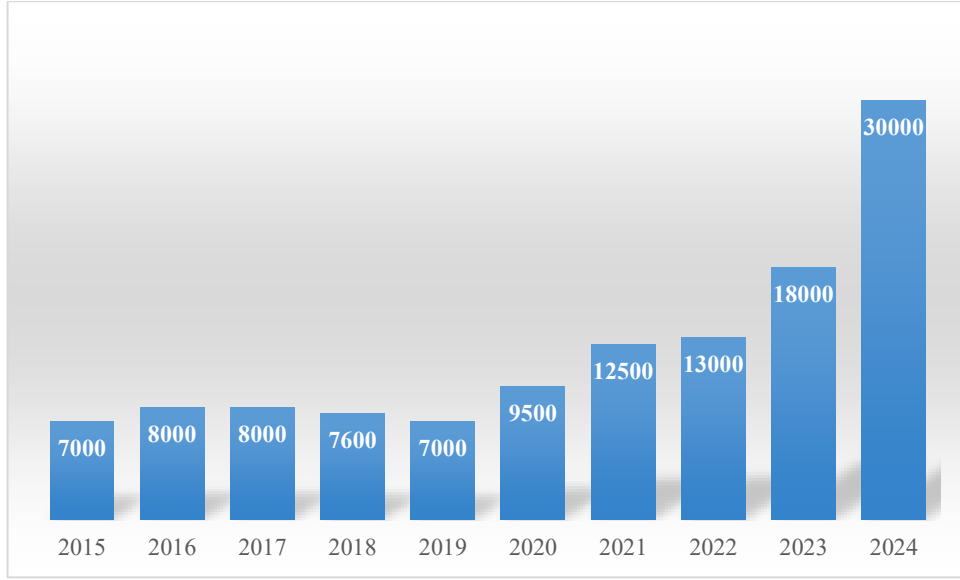
Yer kaynaklı Isı pompası potansiyelinin haritalandırılarak Bakanlık Merkezi Coğrafi Bilgi Sistemine (MCBS) entegre edilmesi, ısıtma ve soğutma talebinin haritalandırılması ve mevcut teknoloji ile yakıt kullanımının belirlenmesi, daha sürdürülebilir ısıtma ve soğutma teknolojilerine geçiş için alternatiflerin belirlenmesi ve ısı pompalarının teşvik edilmesine yönelik taslak plan ve bilinçlendirme materyallerinin hazırlanması (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)



Şekil 32: Türkiye Isı Potansiyeli Haritası

Şekil 32’de verilen bu harita, Türkiye’nin jeotermal enerjiye dayalı ısı potansiyelinin bölgesel dağılımını göstermektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan bu harita, ülke genelinde yeraltı ısı kaynaklarının yoğunluk alanlarını ve ısı enerjisi üretim potansiyeli yüksek bölgeleri ortaya koymaktadır. Haritada yeşil renk ile gösterilen alanlar, jeotermal enerji açısından potansiyel sahaları temsil etmekte olup, bu bölgeler Ege, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Marmara bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, söz konusu bölgelerin jeotermal kaynak çeşitliliği ve ısı enerjisi üretimine elverişli jeolojik yapıları ile ilişkilidir.

Haritada yer alan farklı büyüklükteki mavi ve kırmızı noktalar, Türkiye genelinde tespit edilen ısı potansiyeli uygulama alanlarını ve enerji üretim tesislerini göstermektedir. Mavi noktalar, mevcut veya planlanan jeotermal ısı kullanımı ve ısıtma uygulamalarına işaret ederken, kırmızı noktalar ise endüstriyel ısı tüketim merkezlerini ve ısı talebinin yüksek olduğu bölgeleri ifade etmektedir. Bu harita, Türkiye’nin bölgesel enerji planlaması, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesi ve jeotermal potansiyelin mekânsal analizine yönelik çalışmalarda önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Ayrıca, ısı enerjisi altyapısının geliştirilmesi ve enerji verimliliği politikalarının bölgesel düzeyde yönlendirilmesi açısından da bilimsel bir veri kaynağı sunmaktadır.



Şekil 33: Türkiye'de 2015-2024 Yılları Arasında Satılan Isı Pompası Sayısı

Şekil 33'te verilen grafik, Türkiye'de ısı pompalarının yıllara göre artış eğilimini göstermektedir. 2015 yılında yaklaşık 7.000 birim olan ısı pompası kapasitesi, 2024 yılına gelindiğinde 30.000 birime ulaşarak önemli bir artış sergilemiştir. 2015-2019 döneminde kapasite nispeten durağan bir seyir izlemiş, bu yıllar arasında değerler 7.000-8.000 birim aralığında kalmıştır. Ancak 2020 yılından itibaren belirgin bir artış eğilimi gözlenmiş, 2020'de 9.500 birime, 2021'de 12.500 birime yükselmiştir. 2022 sonrası dönemde artış ivmesi hızlanmış, 2023'te 18.000 birim seviyesine ulaşan kapasite, 2024 yılında yaklaşık %67 oranında bir sıçrama göstererek 30.000 birime yükselmiştir. Bu artış, Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, enerji verimliliği politikalarının güçlenmesi ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik ulusal stratejilerin etkisiyle ilişkilendirilebilir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Türkiye'de ısı pompası teknolojisinin kullanımı son yıllarda hızla yaygınlaşan bir eğilim göstermektedir. Bu eğilim, hem jeotermal ve havadan ısı kaynaklarının değerlendirilmesi hem de konut ve endüstriyel alanlarda sürdürülebilir ısıtma sistemlerine geçişin hız kazandığını ortaya koymaktadır.

Türkiyede ısı pompası artışı için, uzun vadeli teşviklerle desteklenen bütüncül bir dönüşüm stratejisine dayanmalıdır. Ulusal teşvik programı kapsamında tüketiciye uygun finansman ve cazip kredi paketleri sunularak konutların ısı pompalarına geçişi hızlandırılabilir. Bu süreçte, enerji verimliliği sağlayan ekipmanların temini ve yenilenebilir enerjiyle entegre hibrit çözümler (örneğin güneş paneli + ısı pompası) öncelikli olarak desteklenmelidir. Ürün kalite standartlarının belirlenmesi, sertifikasyon süreçlerinin yaygınlaştırılması ve yerli üretime yönelik Ar-Ge teşvikleri hem teknolojik gelişmeyi hem de maliyet avantajını beraberinde getirecektir. Ayrıca kamu öncülüğünde yürütülecek farkındalık kampanyalarıyla uzun vadeli

maliyet avantajı, çevresel faydalar ve enerji bağımsızlığı mesajı topluma yayılmalıdır. Mevzuat tarafında ise enerji verimliliği yatırımlarına en az %30 oranında destek verilerek ısı pompalarının tüm sektörlerde yaygınlaşması sağlanmalı; böylece Türkiye, sürdürülebilir ve düşük karbonlu enerji dönüşümünde güçlü bir adım atmış olacaktır.

1.3. SOĞUTMA KULELERİ

Soğutma kuleleri; petrol rafinerileri, elektrik üretimi, imalat sanayi, termik santraller, su soğutmalı kondenser tabanlı iklimlendirme sistemleri, petrokimya ve diğer kimya endüstrileri gibi termal tahrikli soğutma sistemlerinde atık ısının atmosfere atılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kuleler, endüstriyel süreçlerde oluşan ısının kontrol altına alınmasını ve ortamdan uzaklaştırılmasını sağlayan sistemlerdir. Temel işlevleri, üretim sırasında ısınan suyun sıcaklığını düşürerek yeniden kullanılabilir hâle getirmektir. Genellikle çelik veya betonarme yapı elemanlarından inşa edilen soğutma kuleleri, suyun bünyesindeki ısının çevredeki hava ile ısı alışverişi yoluyla atmosfere aktarılmasını ve böylece sistemin termal dengesinin korunmasını sağlar (Baş, 2024). Bu sistemlerde genellikle su, soğutucu akışkan olarak görev yapmaktadır. Suyun bir kısmı buharlaşarak ortama gizli ısı (latent heat) aktarır ve bu süreç sonucunda geriye kalan suyun sıcaklığı düşer. Soğuyan su yeniden prosese gönderilerek döngü devam eder. Bu ısı transfer mekanizması sayesinde sistemin sürekli çalışması sağlanır. Soğutma kulelerinin güvenilir ve verimli şekilde işletilmesi, enerji tüketiminin azaltılması, sistemin yüksek verimlilikte çalışmasının sürdürülmesi ve prosesin sürekliliğinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Kulelerin optimize edilmemesi durumunda, enerji maliyetlerinde artış, üretim kapasitesinde azalma ve hatta sistem arızaları meydana gelebilmektedir. Ayrıca, soğutma kulelerinin işletimi sırasında su tüketimi, buhar salımı ve çevreye yayılan kirlenici emisyonlar gibi çevresel etkiler de önemli bir değerlendirme konusudur (Alaiwi & Al-Omari, 2024). Bu sistemler arasında, özellikle küçük ölçekli endüstrilerde en sık tercih edilen tür, zorlamalı çekişli karşı akışlı (forced draft counter flow) soğutma kuleleridir. Ayrıca bu tip soğutma kuleleri, laboratuvar ortamlarında eğitim ve gösteri amaçlı olarak da sıkça kullanılmaktadır (Naik vd., 2017).

1.3.1. Soğutma Kulelerinin Sınıflandırılması

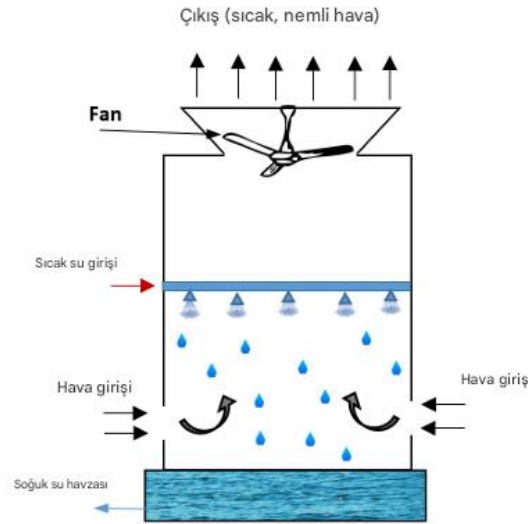
1.3.1.1. Hava akış mekanizmasına göre sınıflandırma

1) Mekanik çekişli soğutma kuleleri

Mekanik çekişli soğutma kuleleri, endüstriyel ve ticari uygulamalarda yaygın biçimde kullanılan temel bir ısı uzaklaştırma sistemidir. Bu kulelerin başlıca işlevi; enerji üretimi,

HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemleri ile kimyasal prosesler gibi çeşitli endüstriyel süreçlerde ortaya çıkan atık ısının atmosfere aktarılmasını sağlamaktır.

Doğal çekişli kulelerden farklı olarak, mekanik çekişli sistemlerde fanlar veya üfleyiciler (blowers) aracılığıyla kule içerisindeki hava akışı artırılır. Bu mekanik destek, hava sirkülasyonunun kontrol edilebilirliğini yükseltir ve soğutma verimliliğini optimize eder. Böylece sistem, çevresel koşullardan daha az etkilenecek kararlı ve yüksek performanslı bir ısı transferi sağlar.



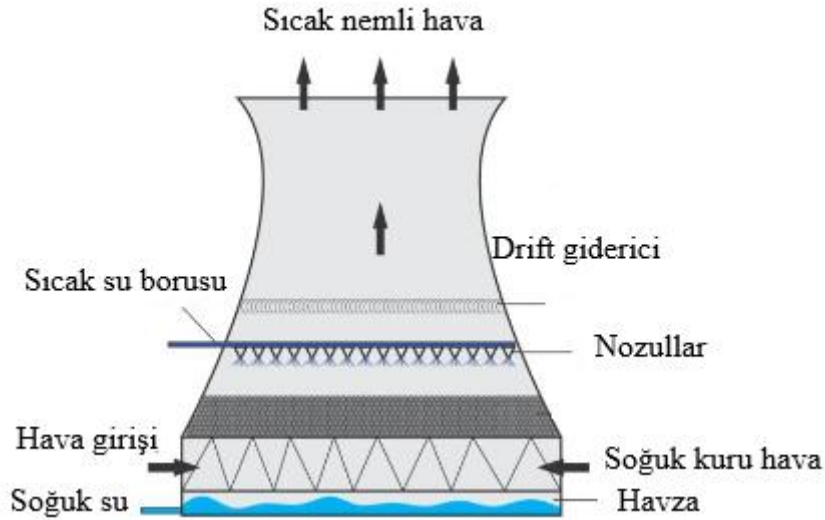
Şekil 34: Mekanik Soğutma Kulesi (Afshari & Dehghanpour, 2019)

Mekanik çekişli soğutma kulelerinin çalışma prensibi, buharlaşmalı soğutma (evaporatif soğutma) esasına dayanır. Endüstriyel proseslerden çıkan sıcak su, kuleye giriş yaptıktan sonra dolgu malzemesi (fill medium) üzerine homojen biçimde dağıtılır. Bu dolgu yüzeyleri, hava ve su arasındaki temas alanını artırarak ısı transferini etkin hale getirir. Fanların oluşturduğu hava akışı, buharlaşma sürecini hızlandırarak su sıcaklığının düşmesini sağlar. Soğuyan su, kule tabanındaki toplama haznesinde biriktirilir ve yeniden sisteme geri devredilerek çevrim tamamlanır. Mekanik çekişli kulelerin temel bileşenleri arasında dolgu elemanları, fanlar, damla tutucular (drift eliminators) ve su dağıtım sistemi yer alır. Kule gövdesi, bu bileşenleri korurken hava akışını düzenleyerek sistem verimliliğini artırır. Bu kule tipi; kompakt yapısı, yüksek ısı uzaklaştırma performansı ve çeşitli iklim koşullarına uyum yeteneği sayesinde farklı endüstriyel ve ticari alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle enerji üretimi, petrokimya tesisleri ve büyük ölçekli HVAC sistemlerinde etkili bir çözüm sunar.

Uygun bir soğutma kulesi seçimi yapılırken; ısı yükü, su debisi, çevre sıcaklığı, nem oranı ve enerji verimliliği gibi parametrelerin bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir (Sutton, 2017).

2) Doğal çekişli soğutma kuleleri

Doğal çekişli (natural draft) soğutma kuleleri, hava dolaşımını sağlamak için doğal konveksiyon prensibinden yararlanan sistemlerdir (Şekil 34). Mekanik çekişli sistemlerden farklı olarak, bu tip kulelerde hava akışı fan veya üfleyici yardımıyla değil, sıcak ve soğuk hava arasındaki yoğunluk farkından kaynaklanan doğal hava hareketiyle gerçekleşir. Kule içerisinde oluşan ısı kaynaklı kaldırma etkisi (thermal buoyancy), sıcak ve nemli havanın yükselmesine neden olurken, bu hava yerini çevreden gelen soğuk ve kuru havaya bırakır. Böylece sistem, doğal hava sirkülasyonu ile sürekli bir soğutma döngüsü oluşturur. Bu prensip, enerji tüketimini azaltması ve bakım gereksiniminin düşük olması nedeniyle büyük ölçekli enerji üretim tesislerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Alaiwi, 2024).



Şekil 35: Doğal Çekişli (Hiperbolik) Soğutma Kulesinin Çalışma Prensibi (Alaiwi & Al-Omari, 2024)

Doğal çekişli soğutma kuleleri, genellikle büyük ölçekli, silindirik ve hiperboloid (ters konik) biçimde tasarlanmış yapılardır. Bu geometrik form, hava akışının dikey yönde yükselmesini optimize ederek ısı transferinin verimliliğini artırır. Endüstriyel prosesten gelen sıcak su, kule tepesinden dolgu yüzeylerine püskürtülerek aşağı doğru akar; bu sırada suyun bir kısmı buharlaşır ve kalan suyun sıcaklığı düşer. Yükselen sıcak ve nemli hava kule tepesinden atmosfere atılırken, soğuyan su alt haznede toplanarak sisteme geri devredilir.

Bu kule tipi, yüksek soğutma kapasitesi gerektiren tesislerde, özellikle termik santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fan gerektirmemesi nedeniyle işletme maliyetleri düşük olsa da, büyük boyutları ve karmaşık yapısal tasarımı sebebiyle ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Ayrıca sistemin verimli çalışabilmesi için hava ve su sıcaklıkları arasındaki farkın belirli bir düzeyde olması gerekmektedir (Alaiwi & Al-Omari, 2024). Enerji açısından oldukça verimli olan doğal çekişli kuleler, değişken ısı yüklerine uyum sağlama yeteneği açısından sınırlıdır. Ayrıca, geniş hacimleri ve görsel etkileri nedeniyle kentsel alanlarda tercih edilmezler. Bununla birlikte, uzun vadeli işletme tasarrufu ve yüksek soğutma kapasitesi gerektiren endüstriyel tesislerde etkin ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaya devam etmektedirler.

1.3.1.2. Isı transfer mekanizmasına göre sınıflandırma

1) Islak Soğutma Kuleleri (Wet Cooling Towers)

Islak soğutma kuleleri, ısı uzaklaştırma sürecinde suyun buharlaşma prensibine dayalı çalışan sistemlerdir. Bu kulelerde su, dolgu elemanları (fill media) üzerine püskürtülür veya akıtılır; bu işlem, hava ve su arasındaki temas yüzeyini artırarak ısı transferinin etkinliğini yükseltir. Kule içerisinden geçen hava, suyun bir kısmının buharlaşmasına neden olur ve bu sayede ısı, ortam havasına taşınarak uzaklaştırılır (Şekil 35). Bu yöntem, yüksek soğutma verimi sağladığı için endüstriyel tesislerde ve HVAC sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

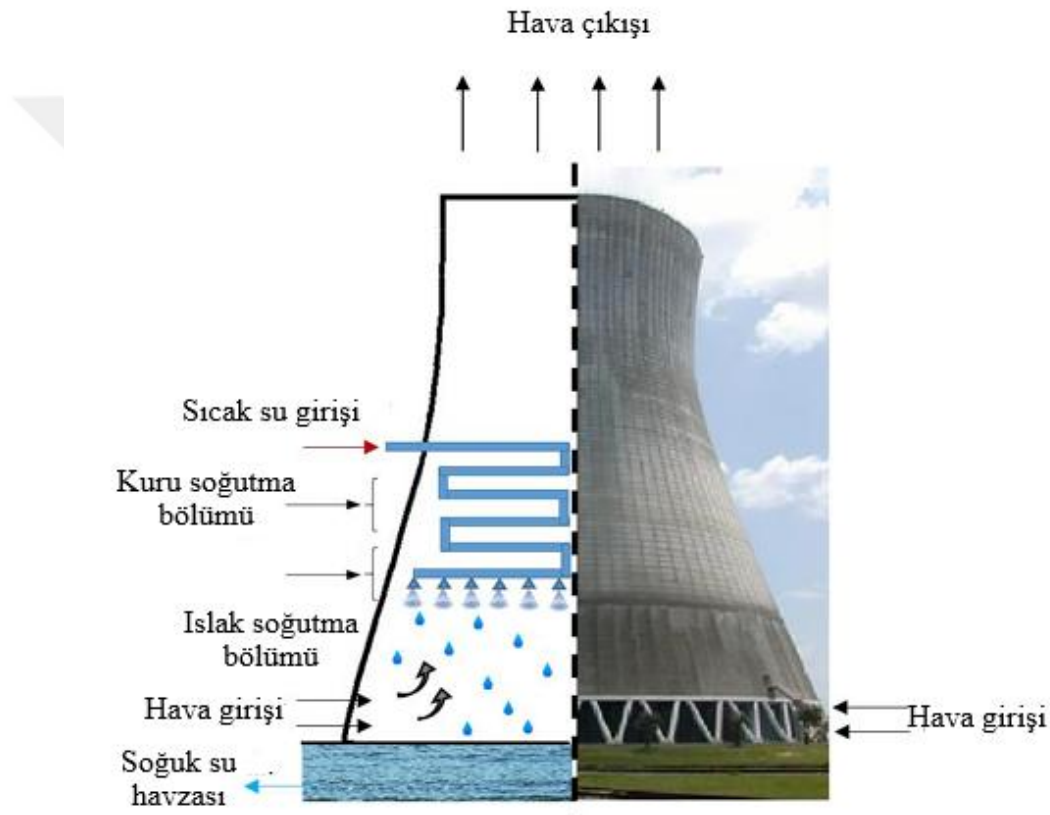
Bununla birlikte, ıslak soğutma kuleleri önemli miktarda su tüketimine neden olur. Buharlaşma sırasında meydana gelen damlacık taşınımı (drift), yani küçük su damlalarının atmosfere karışması, çevresel kayıplara ve kimyasal taşınımaya yol açabilir (Mahdi vd., 2015). Bu etkileri azaltmak amacıyla kulelerde damla tutucular (drift eliminators) kullanılmaktadır. Ancak su kaynaklarının sınırlı olduğu ya da çevresel kısıtlamaların sıkı olduğu bölgelerde, ıslak soğutma kulelerinin kullanımı sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilemez.

2) Kuru Soğutma Kuleleri (Dry Cooling Towers)

Kuru soğutma kuleleri, diğer adıyla hava soğutmalı kuleler (dry coolers), ısı transferinde suyun buharlaşmasına gerek duymayan sistemlerdir. Bu kulelerde ısı uzaklaştırma işlemi, yalnızca hava akımı yoluyla gerçekleştirilir. Genellikle kapalı çevrimli (closed-circuit) yapıya sahiptirler; bu çevrimde soğutucu akışkan (çoğunlukla su veya glikol karışımı) bir ısı değiştirici (heat exchanger) içerisinde sürekli dolaşır ve prosese geri gönderilir.

Sıcak akışkan, ısı değiştirici boruları boyunca ilerlerken, borulara bağlı kanatlı yüzeylerle (fins) temas eden hava akımı sayesinde ısını dış ortama bırakır (Şekil 35). Fanlar, ortam havasını bu yüzeylerin üzerinden geçirerek akışkanın etkin bir şekilde soğutulmasını sağlar. Bu sayede sistem, su tüketimi olmadan ısı uzaklaştırma işlemini gerçekleştirir.

Kuru soğutma kuleleri, düşük su tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajlar sunar. Ancak yüksek ortam sıcaklıklarında verimlerinin azalması ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, bu sistemlerin başlıca dezavantajları arasında yer alır. Buna rağmen, su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde ve çevresel düzenlemelere duyarlı tesislerde tercih edilen etkili bir ısı uzaklaştırma çözümüdür.



Şekil 36: Kuru Soğutma Kulesinin Çalışma Prensibi (Afshari & Dehghanpour, 2019)

3) Hibrit Soğutma Kuleleri (Hybrid Cooling Towers)

Hibrit soğutma kuleleri, ıslak ve kuru soğutma sistemlerinin avantajlarını bir araya getiren yenilikçi sistemlerdir. Bu kuleler, her iki yöntemin sınırlamalarını azaltarak soğutma verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Hibrit kuleler, buharlaşmalı (ıslak) soğutma ile hava soğutmalı (kuru) soğutmayı birleştirerek su tasarrufu, soğutma verimliliği ve işletme esnekliği arasında denge sağlar. Bu özellikleriyle, değişken iklim koşullarının veya değişken işletme gereksinimlerinin bulunduğu ortamlar için oldukça uygundur (ASHRAE, 2021).

Hibrit soğutma kuleleri, ıslak ve kuru soğutma prensiplerini bir arada kullanan sistemlerdir. Bu kulelerde soğutma işlemi, iki aşamalı bir süreç şeklinde gerçekleşir: Öncelikle kuru bölümde, ısıtılmış akışkan kanatlı ısı değiştirici borular üzerinden geçerek hava akımıyla ön soğutulur. Ardından ıslak bölümde, akışkan buharlaşmalı soğutmaya tabi tutularak daha düşük sıcaklıklara indirilir. Böylece sistem, yüksek soğutma verimini korurken su tüketimini azaltır. Hibrit sistemler, çevresel koşullara ve soğutma yüküne göre esnek biçimde çalışabilir. Düşük sıcaklık veya hafif yük koşullarında yalnızca kuru soğutma modu devrede olurken, yüksek sıcaklıkta ıslak soğutma modu devreye girer. Bu esneklik, hem enerji hem de su kullanımında tasarruf sağlar.

Bu kulelerin temel avantajı, geleneksel ıslak kulelere göre su tüketimini azaltması ve farklı iklim koşullarında verimli şekilde çalışabilmesidir. Ayrıca, görünür buhar bulutlarını (plume) azaltma veya tamamen ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir. Tasarım esnekliği sayesinde sistemler, verimlilik, su tasarrufu veya maliyet öncelikleri dikkate alınarak uyarlanabilir. Bununla birlikte, hibrit kuleler daha karmaşık yapıya ve yüksek ilk yatırım maliyetine sahiptir. Buna rağmen, enerji üretimi, kimya endüstrisi ve su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerdeki HVAC uygulamaları gibi alanlarda, sürdürülebilir ve verimli soğutma çözümleri sunmaları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir (Lemouari vd., 2008).

1.3.1.3. Kullanım alanına göre sınıflandırma

1) Endüstriyel Soğutma Kuleleri (Industrial Cooling Towers)

Endüstriyel soğutma kuleleri, yüksek ısı yüklerinin bulunduğu proseslerde ısı uzaklaştırma amacıyla tasarlanan sistemlerdir. Bu kuleler, başta enerji üretimi, petrol rafinasyonu, kimyasal prosesler ve çelik endüstrisi olmak üzere birçok ağır sanayi alanında kullanılmaktadır. Genellikle kesintisiz çalışmaya uygun şekilde tasarlanır ve zorlu çevresel ile operasyonel koşullara dayanacak yapısal özelliklere sahiptir. Kule tipi, tesisin ihtiyaçlarına göre doğal çekimli veya mekanik çekimli olarak seçilir. Uygun sistemin belirlenmesinde; ısı atım kapasitesi, iklim koşulları, su kaynağı durumu ve tesis yerleşim kısıtlamaları gibi etkenler dikkate alınır (Van Vliet vd., 2016). Bu yönüyle endüstriyel soğutma kuleleri, sistem verimliliğini korurken aynı zamanda proses güvenilirliğini ve enerji sürdürülebilirliğini destekleyen kritik altyapı bileşenleri olarak değerlendirilmektedir.

2) HVAC Soğutma Kuleleri (HVAC Cooling Towers)

HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerinde kullanılan soğutma kuleleri, su soğutmalı soğutuculardan (water-cooled chillers) gelen fazla ısının atmosfere

aktarılmasını sağlayan bileşenlerdir. Bu kuleler, endüstriyel sistemlere kıyasla daha küçük ölçekli olup, genellikle kesikli çalışma (intermittent operation) prensibine göre tasarlanır. HVAC soğutma kuleleri, hastaneler, ofis binaları, alışveriş merkezleri gibi konfor koşullarının sürekliliğinin önemli olduğu yapılarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde temel amaç, iç ortam hava kalitesinin korunması ve sıcaklık kontrolünün hassas biçimde sağlanmasıdır. Böylece hem enerji verimliliği artırılır hem de kullanıcı konforu güvence altına alınır (Van Vliet vd., 2016).

1.4. KAZANLAR

Kazan, içinde bulunan yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerjiyi sistemdeki akışkana aktaran bir ekipmandır. Bu süreçte yakıtın kimyasal enerjisi ısı enerjisine dönüştürülür. Ancak oluşan ısıнын tamamı akışkana geçmez; bir kısmı kazanın yüzeyinde tutulur, diğer kısmı ise baca gazı aracılığıyla atmosfere kaybolur (Akmeşe, 2023). Endüstriyel tesislerde kazanlar, sistemin ısı enerjisi ihtiyacını karşılayarak proseslerin sürekliliğini sağlar. Kullanılan yakıt türüne, kapasitesine ve işletme basıncına bağlı olarak çeşitli kazan tipleri (örneğin buhar kazanları, sıcak su kazanları veya kızgın yağ kazanları) bulunmaktadır. Enerji verimliliği açısından, kazanlarda yanma veriminin artırılması, baca gazı sıcaklıklarının düşürülmesi ve atık ısıнын geri kazanılması büyük önem taşımaktadır.

Kazanlarda enerji tasarrufu sağlamak, yakıt tüketimini azaltmak ve sistem verimini artırmak açısından önemlidir. Bunun için öncelikle kazanın kullanım alanına uygun kapasitede seçilmesi gerekir. Uygun tesisat seçimi ve iyi bir ısı yalıtımı, ısı kayıplarını en aza indirir. Otomatik kontrol sistemleriyle hava-yakıt oranı doğru ayarlanarak tam yanma sağlanmalı, bu da hem verimi artırır hem de emisyonları azaltır. Kazanın düzenli olarak periyodik bakımı yapılmalı, yanma yüzeyleri temiz tutulmalıdır. Ayrıca, kazan tasarımında yeterli ısı transfer yüzeyi ve uygun ocak hacmi sağlanarak ısıнын etkin biçimde akışkana geçmesi hedeflenmelidir (Akmeşe, 2023). Şekil 37’de bir sıcak su kazanının çalışma prensibi (Çomaklı & Terhan, 2011) şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 37: Kazan Sisteminde Enerji Akış Şeması

Kazana giren yakıt ve hava karışımı, yanma odasında tepkimeye girerek ısı enerjisi açığa çıkarır. Bu enerji, kazanın içinde dolaşan suya aktarılır. Isınan su, sistemin ihtiyacı olan alanlara (örneğin radyatörler veya proses hatları) gönderilirken; soğuyan su, tekrar kazana geri dönerek döngüyü tamamlar.

Yanma işlemi sonucunda oluşan baca gazları, kazan yüzeyinden ve gaz çıkışından çevreye bir miktar ısı kaybına neden olur. Şekilde de görüldüğü üzere, kazandaki ısı kayıpları iki ana yolla gerçekleşmektedir:

Yüzey kayıpları, kazanın dış yüzeyinden çevreye yayılan ısı şeklindedir.

Baca gazı kayıpları ise, yanma sonucu oluşan sıcak gazların bacadan atmosfere atılmasıyla meydana gelir.

Bu kayıpların minimize edilmesi, kazanın termal veriminin artırılması açısından son derece önemlidir. Uygun yalıtım, düzenli bakım ve doğru hava–yakıt oranı ayarı ile yüzey ve baca kayıpları azaltılabilir. Böylece kazanda üretilen ısının daha büyük bir bölümü suya aktarılır ve enerji verimliliği yükselir.

Kazanlarda yanma sonucu ortaya çıkan baca gazları, yüksek sıcaklıkta oldukları için önemli miktarda atık ısı taşırlar. Bu nedenle baca gazlarından ısının geri kazanılması, enerji verimliliğini artırmak açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu kayıp enerjinin değerlendirilmesi amacıyla endüstride farklı ısı geri kazanım sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler arasında en yaygın olanları ekonomizerler ve hava ön ısıtıcılarıdır. Ekonomizerler, yalnızca kazanlarda kullanılarak baca gazındaki atık ısıyı besli suyuna aktarırlar. Hava ön ısıtıcıları ise hem kazan hem de endüstriyel ocaklarda kullanılabilir ve baca gazındaki ısıyı yanma havasına iletirler (Çomaklı & Terhan, 2011).

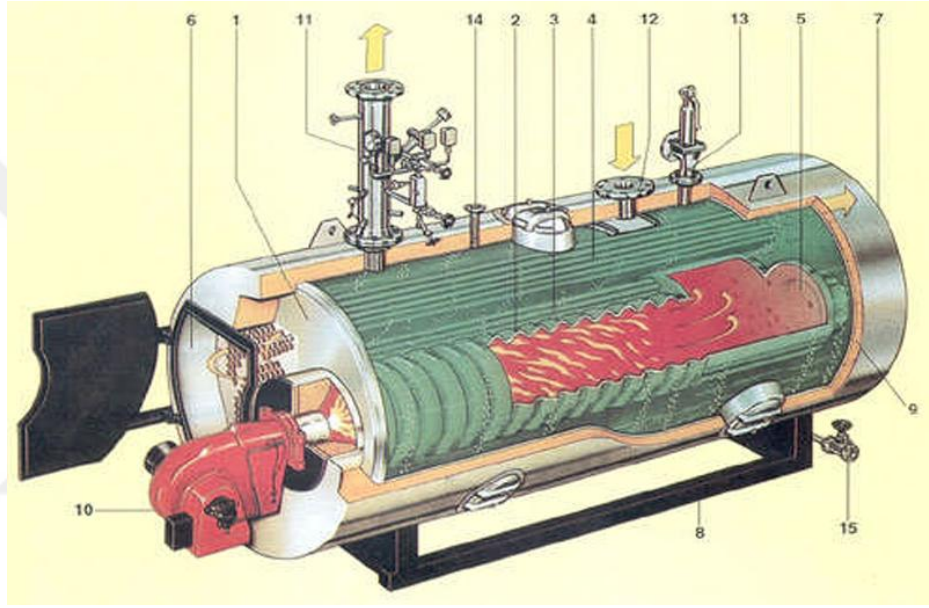
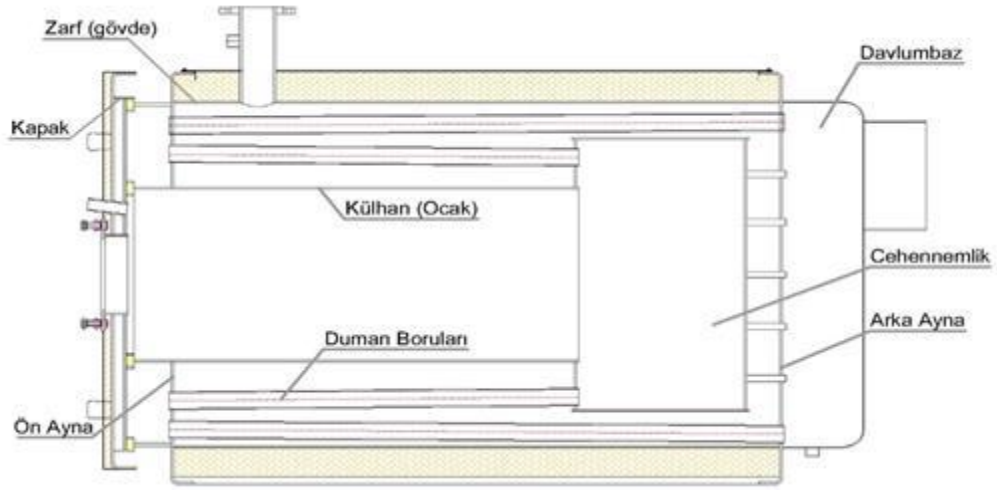
Bu ekipmanlar sayesinde, baca gazındaki kayıp ısı yeniden değerlendirilir ve sistemin genel verimi artar. Böylece, yakıt tüketimi azalır, ısı kayıpları düşer ve çevreye yayılan emisyon miktarı önemli ölçüde azalır.

Bu enerji dönüşüm süreci, ilerleyen bölümlerde incelenecek olan ısı pompası ve soğutma kulesi sistemleriyle entegre edildiğinde, atık ısının yeniden değerlendirilmesi mümkün hale gelir. Böylece hibrit sistemlerde hem yakıt tüketimi azalır hem de ısı geri kazanımıyla toplam enerji kazancı artar.

1.4.1. Sıcak Su Kazanları

Sıcak su kazanı, yüzeylerinin bir tarafı ısı alan ve içerisinde su bulunan; diğer tarafında ise yakıtın yanması sonucu oluşan alev ve duman gazlarının dolaştığı, kapalı bir sistem içinde çalışan basınçlı haznelerdir. Bu kazanlar atmosfer basıncında, doymuş buhar sıcaklığı olan 100°C'nin altında sıcak su üretirler (TSB Energy, 2019). Kazanda ısıtılan su, tesisatta bulunan sirkülasyon pompası aracılığıyla radyatörlere gönderilir. Radyatörlerde ısınıp ortama bırakan su, soğuyarak tekrar kazana döner. Kazana geri dönen bu suyun ısısı yeniden yükseltilerek sistem içine gönderilir ve bu işlem sürekli bir döngü şeklinde tekrarlanır (Yurtcu, 2020).

Kazanlarda yakıt olarak doğalgaz, motorin, LPG, fuel-oil gibi sıvı ve gaz yakıtların yanı sıra odun, kömür, talaş, pirina gibi katı yakıtlar da kullanılabilir. Kullanılan yakıt türü, bulunduğu bölgenin enerji altyapısı ve maliyet koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle kazan tasarımı, kullanılacak yakıtın alt ısı değeri, yanma özellikleri ve kapasite gereksinimlerine uygun biçimde yapılmalıdır. Tasarımcı, yanma odası boyutları, ocak mesafesi ve ısı transfer yüzey alanı gibi kriterleri dikkate alarak optimum verim ve güvenliği sağlayacak şekilde kazan tasarımını gerçekleştirmelidir. Şekilde sıcak su kazanlarına ait bir görsel verilmiştir (Yurtcu, 2020).



Şekil 38: Sıcak Su Kazanının Yapısı

Sıcak Su Kazanının Ana Bileşenleri

1. Kazan gövdesi- Kazanın ana taşıyıcı yapısı olup, suyun bulunduğu kısımdır.
2. Külhan (Ocak)- Yanmanın gerçekleştiği bölümdür.
3. Duman boruları 2. geçiş- Yanma sonucu oluşan dumanın ikinci geçişte ısı aktarımı yaptığı borulardır.
4. Duman boruları 3. geçiş- Dumanın üçüncü geçişte kalan ısını suya aktardığı borulardır.
5. Cehennemlik- Yanma odasını çevreleyen, suyla soğutulan bölümdür.
6. Ön duman sandığı -Yanma gazlarının yönlendirildiği ön bölmedir.
7. Duman gazı çıkışı -Dumanın bacaya iletildiği çıkıştır.
8. Kazan kaidesi- Kazanın oturduğu ve yükünü taşıyan taban yapısıdır.
9. İzolasyon brülörü- Isı kaybını önlemek amacıyla kullanılan yalıtım kısmıdır.

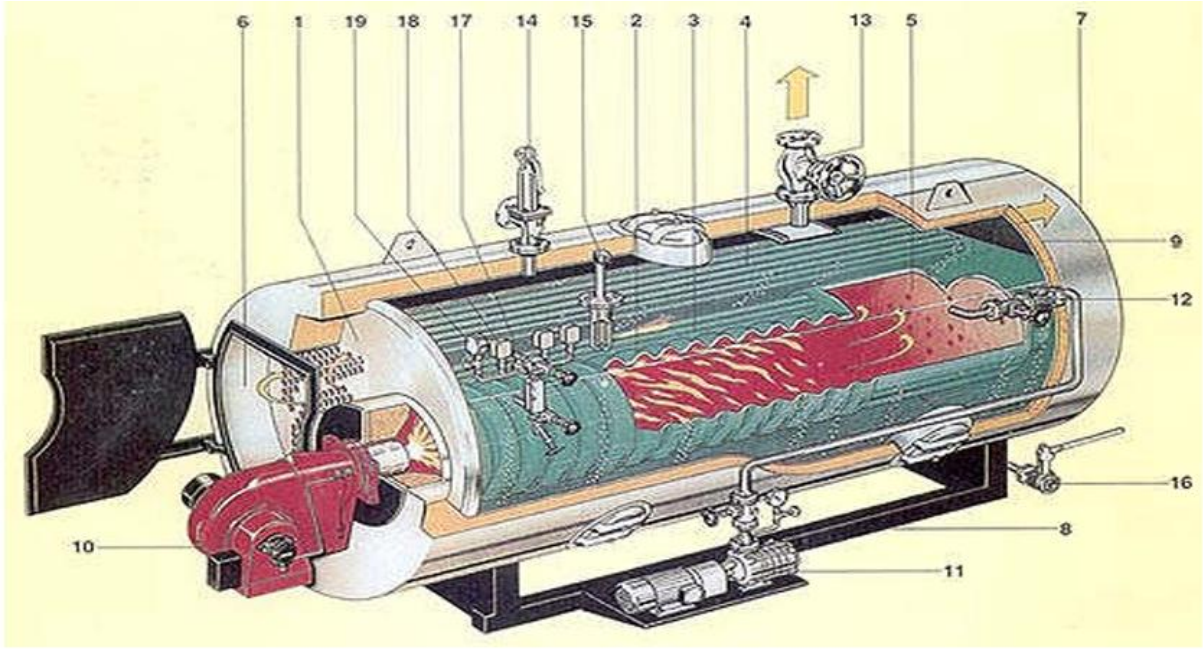
10. Gaz ve/veya fuel-oil brülörü- Yakıtın yanmasını sağlayan ekipmandır.
11. Su çıkışı (armatürlerle birlikte)- Kazandan sisteme giden sıcak su çıkış noktasıdır.
12. Su dönüşü- Sistemde soğuyan suyun kazana geri döndüğü bağlantıdır.
13. Emniyet vanası- Basınç artışına karşı sistemi koruyan güvenlik elemanıdır.
14. Besi suyu girişi- Sisteme taze suyun beslendiği noktadır.
15. Blöf vanası- Kazandaki tortu ve birikintilerin dışarı atılmasını sağlayan tahliye vanasıdır.

1.4.2. Buhar Kazanları

Buhar kazanı, atmosfer basıncının üzerinde bir basınçta su buharı, sıcak su veya kızgın yağ üretebilen yanmalı basınçlı kap olarak tanımlanmaktadır. Endüstriyel tesislerde ve gemilerde kullanılan bu sistemler, genellikle su gibi bir akışkanın ısı enerjisiyle istenilen basınca kadar buhara dönüştürüldüğü kapalı sistemlerdir (Başhan & Demirel, 2019).

Tarihsel süreçte farklı tipte buhar kazanları geliştirilmiş ve kontrol yöntemleri üzerine birçok patent alınmıştır. Buhar kazanları, özellikle denizcilik sektöründe gemilerin yardımcı makineleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu sistemler, yakıt tanklarının, makine ekipmanlarının ve yaşam mahallerinin ısıtılmasında etkin şekilde kullanılmaktadır. Buhar kazanlarının temel işlevi, yakıtın yanmasıyla veya ana makine egzoz gazlarının ısısından yararlanarak, kazan içerisindeki suyu yüksek sıcaklıktaki buhara dönüştürmektir (Başhan & Demirel, 2019). Gemi seyir halindeyken buhar üretimi, hem enerji ihtiyacını karşılamakta hem de gemi içi sistemlerin sürekli çalışmasını sağlamaktadır.

Kazanların yapısal tasarımı ve işletme prensiplerine göre sınıflandırılması, verimlilik ve performans açısından büyük önem taşır. Kazan işletiminde yakıtın yanması, yanma için gerekli havanın sağlanması, suyun buhara dönüştürülmesi ve su arıtma süreçleri dikkatle yönetilmelidir. Ayrıca korozyon etkileri, buhar basınçlarının kontrolü ve işletme koşullarının optimizasyonu, sistemin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışması için kritik öneme sahiptir (Mutlu, 2025).



Şekil 39: Buhar Su Kazanının Yapısı

1. Kazan gövdesi: Suyun bulunduğu ve buhara dönüştüğü ana basınçlı haznedir.
2. Külhan (Ocak): Yanmanın gerçekleştiği bölümdür; burada yakıt ile hava karışımı yakılarak ısı enerjisi üretilir.
3. Duman boruları (2. geçiş): Yanma sonucu oluşan sıcak gazların geçtiği borulardır; bu sayede ısı suya aktarılır.
4. Duman boruları (3. geçiş): Yanma sonucu oluşan sıcak gazların geçtiği borulardır; bu sayede ısı suya aktarılır.
5. Su soğutmalı cehennemlik: Yanma odasının etrafında yer alan ve aşırı sıcaklığı önleyen su ile soğutulan kısımdır.
6. Ön duman sandığı: Yanma gazlarının duman borularına yönlendirildiği bölmedir.
7. Duman gazı çıkışı: Yanma gazlarının bacaya iletildiği çıkıştır.
8. Kazan kaidesi: Kazanın ağırlığını taşıyan ve zemine sabitlenmesini sağlayan taban yapısıdır.
9. İzolasyon: Kazan yüzeyindeki ısı kayıplarını azaltmak için kullanılan yalıtım malzemesidir.
10. Brülör: Yakıtın yanmasını sağlayan otomatik ateşleme ünitesidir.
11. Besi suyu pompası: Sisteme suyu basınçla kazana gönderen pompadır.
12. Besi suyu vanası: Kazana giren besin suyunun akışını kontrol eder.
13. Buhar vanası: Üretilen buharın çıkışını ve sistem basıncını düzenler.
14. Emniyet vanası: Kazan iç basıncının tehlikeli seviyelere çıkmasını önleyen güvenlik elemanıdır.

15. Su seviye şamandırası: Kazandaki su seviyesini kontrol eder.
16. Blöf vanası: Kazandaki tortu ve birikintilerin dışarı atılmasını sağlar.
17. Su seviye göstergesi: Kazandaki su miktarını görsel olarak izlemeye yarar.
18. Presostat: Kazan iç basıncını algılayarak brülörün çalışma durumunu kontrol eder.
19. Manometre: Kazan iç basıncını gösterir ve basınç takibini sağlar.

Bu elemanlar birlikte çalışarak kazanın güvenli, verimli ve sürekli buhar üretimi gerçekleştirmesini sağlar. Özellikle brülör, külhan ve duman boruları kazanın ısı transfer performansını belirlerken; emniyet vanası, presostat ve manometre güvenlik açısından kritik bileşenlerdir.



İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

2.1. SİSTEM KURULUMUNUN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışma kapsamında incelenen sistem, bir lastik üretim tesisinde enerji verimliliğini artırmak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla hayata geçirilmiştir. Fabrika, son yıllarda artan çevresel sürdürülebilirlik gereklilikleri doğrultusunda elektrifikasyon sürecine geçmeyi ve doğalgaz tüketimini azaltarak fosil yakıtlara olan bağımlılığını minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu amaçla tesis, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik çeşitli uygulamaları devreye almıştır.

Fabrika, daha önce tesis çatısına kurulan güneş enerji sistemi ile elektrik üretimini kısmen yenilenebilir kaynaklara kaydırmıştır. Bu doğrultuda, enerji dönüşüm sürecine katkı sağlamak amacıyla ısı pompası sistemine dayalı yeni bir ısıtma-soğutma altyapısı tasarlanmıştır.

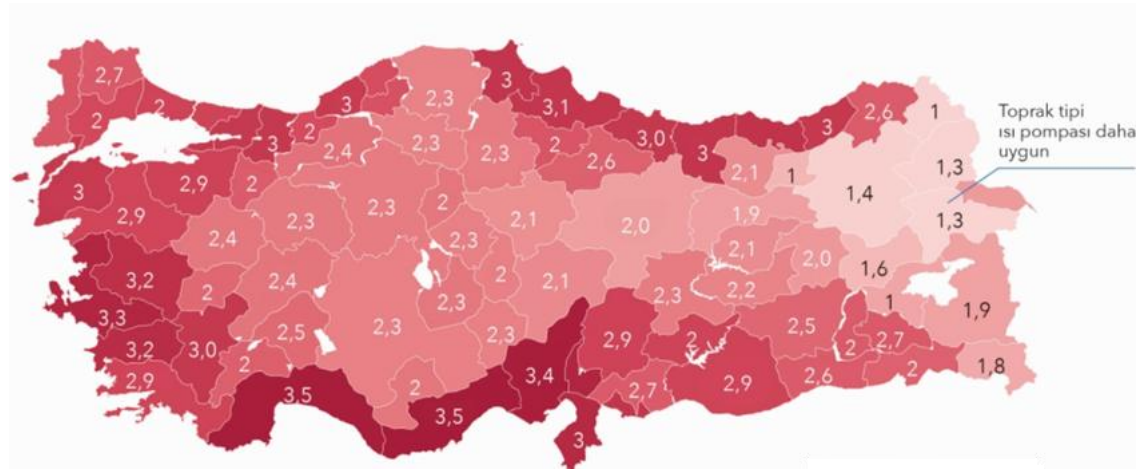
Kurulan sistemde soğutma kulesi ve su kaynaklı ısı pompası temel bileşenler olarak yer almaktadır. Isı pompası, sistemin ana enerji dönüşüm elemanı olarak görev yaparken, soğutma kulesi ise ısıl dengeyi sağlayacak şekilde entegre edilmiştir. Ancak, dış ortam sıcaklığının düşük olduğu dönemlerde ısı pompası ve soğutma kulesinin kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda, kazan sistemi devreye alınarak süreç sürekliliği sağlanmaktadır.

Bu bütünsel yapı sayesinde fabrika, üretim süreçlerinde enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını hedeflemekte; aynı zamanda karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirlik stratejilerini güçlendirmektedir.

Çalışma Aksaray ilinde gerçekleştirilmiş olup, hesaplamalarda kullanılan iklimsel verilerin daha net ortaya konabilmesi amacıyla Aksaray iline ait yıllık ortalama sıcaklık değerleri tablo halinde sunulmuştur. Bu veriler, bölgenin ısı özelliklerinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde temel girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, yapılan analizlerin ülke genelinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için Türkiye genelindeki ısı pompası performans katsayısı (COP) dağılımını gösteren harita da görsel olarak verilmiştir. Böylece, hem bölgesel hem de ulusal ölçekte sistemin verimlilik potansiyeli ve performans değişimi kapsamlı biçimde analiz edilebilmiştir.

Tablo 2: Aksaray İli Yıllık Sıcaklık Tablosu

AKSARAY	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1929 - 2024)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	0,6	2,1	6,4	11,6	16,2	20,3	23,6	23,4	18,8	13,4	7,3	2,7	12,2
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	5,6	7,6	12,5	18,1	23,0	27,2	30,7	30,8	26,7	21,0	13,8	7,8	18,7
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-3,5	-2,1	1,3	5,7	9,7	13,2	16,3	16,0	11,5	6,9	2,0	-1,3	6,3
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3,2	4,5	5,7	7,1	9,1	11,1	12,1	11,5	9,7	7,1	5,0	3,2	7,4
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	9,91	9,84	10,64	10,51	10,46	6,23	1,56	1,46	2,84	5,39	7,13	10,49	86,5
Aylık Yağış Ortalaması (mm)	40,4	34,4	41,2	45,3	43,6	29,1	7,0	5,7	12,3	23,3	31,5	45,8	359,6
Ölçüm Periyodu (1929 - 2024)													
En Yüksek Sıcaklık (°C)	20,4	21,8	29,0	31,8	34,4	36,9	40,0	40,8	38,7	34,5	29,5	22,0	40,8
En Düşük Sıcaklık (°C)	-26,4	-29,0	-19,0	-7,5	-0,2	2,9	6,8	5,9	1,0	-6,0	-14,0	-21,9	-29,0

**Şekil 40:** Türkiye Hava Kaynaklı Isı Pompası COP Değerleri

Isı pompaları diğer ısıtma ve soğutma sistemlerine kıyasla daha yüksek verimlilikle çalışırken toplam enerji ihtiyacını ise azaltmaktadır. Toplam elde edilen ısıtma kapasitesinin toplam ihtiyaç duyulan güç değerine oranını ifade eden COP değeri, ısı pompasında 1,5 ile 4 arasında değişirken, doğal gaz kazanlarında bu değer 0,9 civarındadır. Bu rakamlara

bakıldığında Isı pompasıyla enerji güç değerinin 1,5 ila 4 katı ısı üretebilir. Fosil yakıtlarda ise kayıplar nedeniyle elde edilen ısı enerjisi, enerji girdisinden daha düşük olmaktadır.

COP değerine göre Türkiye, özellikle de kıyı bölgeleri, ısı pompaları için yüksek potansiyele sahiptir. COP değeri ne kadar yüksekse ısı pompalarının kullanımı da o kadar verimli ve ekonomik olmaktadır. Hava kaynaklı, su kaynaklı ve toprak kaynaklı olmak üzere üç tip ısı pompası vardır. Uygulaması diğer tiplere kıyasla daha kolay ve ekonomik olan hava kaynaklı ısı pompaları için Türkiye COP değeri ortalaması 2,75'tir. Bu durum, ısı pompalarının yüksek verimliliği nedeniyle nihai tüketim verimliliğinde %64'lük bir iyileşme sağlamaktadır. Yukarıda paylaşılan Türkiye hava kaynaklı Isı Pompası ortalama COP değerlerinden hareketle; düşük COP değerlerine sahip olan özellikle Doğu Anadolu-Doğu Karadeniz bölgesinde toprak kaynaklı hava pompalarının tercih edilmesi enerji verimliliği açısından oldukça önemlidir.

2.2. VERİ TOPLAMA VE SİSTEM BİLEŞENLERİ

Bu çalışmada, Aksaray ilinde faaliyet gösteren bir lastik üretim tesisinden elde edilen sıcak su kazanına ait doğalgaz tüketim verileri esas alınmıştır. İlgili veriler kullanılarak, kazan verimi üzerinden sıcak su üretim kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, fabrikanın mevcut enerji altyapısının performansını belirlemek ve ısı pompası entegrasyonu sonrası oluşacak enerji ve maliyet avantajlarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, ısı pompası sisteminin sağlayacağı enerji tasarrufu ve ekonomik kazançlar ayrıntılı olarak analiz edilmiş; sonuçlar karşılaştırmalı olarak tablo halinde sunulmuştur. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler, fabrikanın mevcut doğalgaz tüketim profiliyle ısı pompası destekli sistem performansını kıyaslayarak enerji dönüşümünün etkinliğini ortaya koymayı hedeflemiştir.

2.2.1. Sistemde Kullanılan Kazan, Isı Pompası ve Soğutma Kuleleri

Bu çalışma kapsamında incelenen sistemde, ısıtma ve soğutma yüklerinin karşılanmasında sıcak su kazanı, su kaynaklı ısı pompası ve soğutma kulelerinden oluşan bütünleşik bir yapı kullanılmaktadır. Sistem, mevsimsel koşullara göre değişen enerji ihtiyacını karşılamak üzere otomasyon destekli olarak işletilmektedir.

2.2.1.1. Kazanlar

Tesiste 3 adet buhar, 3 adet sıcak su kazanı bulunmaktadır.



Şekil 41: Sıcak Su ve Buhar Kazanları

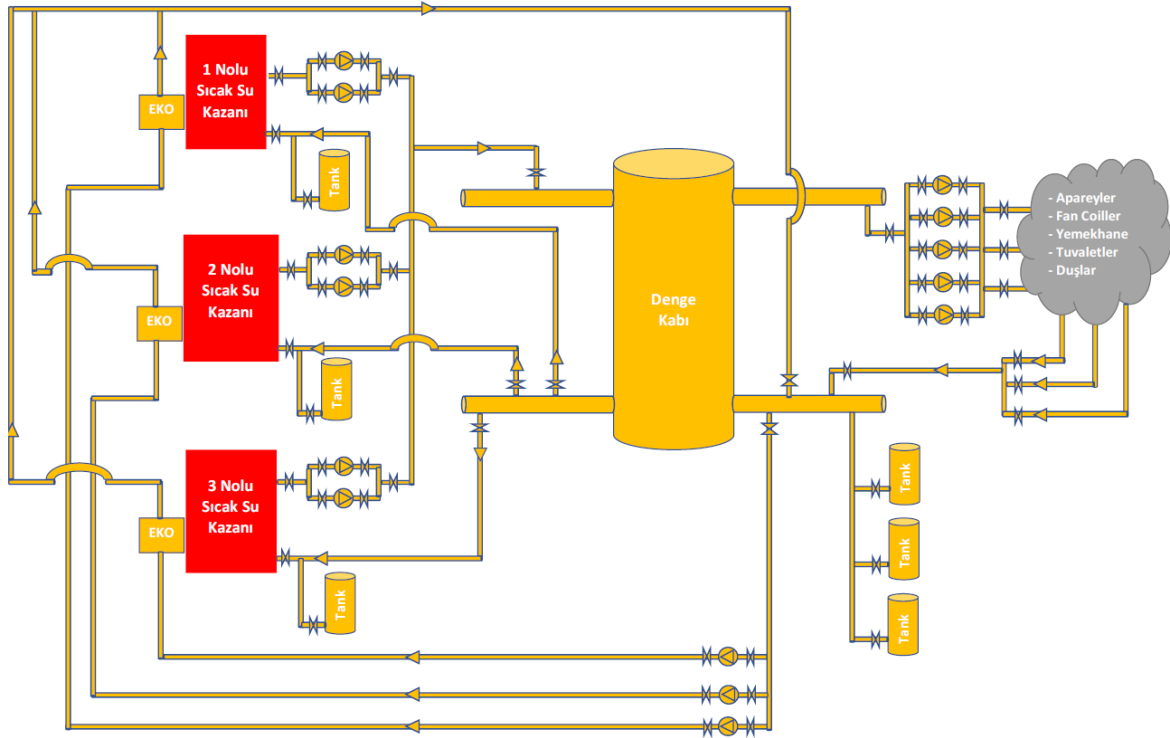
Tesiste bulunan 3 adet buhar kazanı, üretim süreçlerinde farklı basınç seviyelerinde ihtiyaç duyulan buharı sağlamaktadır. Bu kazanlardan elde edilen buhar, fırınlarda kauçuk ısıtma, mikser yağ tanklarında yağın ısıtılması, tekstil kalender hattında kauçuk malzemenin ısıtılması, pişirme presleri ve kalıp sahasında kalıpların ısıtılması ile ürün kontrol bölümündeki tamir makinelerinde kullanılmaktadır. Böylece üretim sürecinde gerekli olan termal enerji, merkezi buhar hattı üzerinden ilgili proses noktalarına iletilmektedir. Ayrıca tesiste 3 adet sıcak su kazanı bulunmakta olup, bu kazanlar apareyler, fan-coil sistemleri ve lavabo sıcak su hatlarına hizmet etmektedir. Sıcak su sistemi, fabrikanın konfor ısıtması ile yardımcı servis alanlarının sıcak su ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Tesis genelinde buhar hatlarında yoğuşma suyunun geri kazanımı için ortalama 150 adet şamandıralı kondenstop kullanılmaktadır. Bu kondenstoplar, sistemde yoğuşan suyun otomatik olarak tahliyesini sağlayarak hatlarda buhar birikimini önlemekte ve enerji verimliliğini artırmaktadır.

Kazan dairesinde yapılan incelemeler sonucunda, sıcak su ve buhar üretim sistemlerine ait ekipmanlar belirlenmiş, sistemlerin çalışma prensipleri detaylı olarak incelenmiştir. Her iki

sisteme ait kazanların etiket bilgileri kayıt altına alınmış ve tablo hâlinde sunulmuştur. Sıcak su kazanlarına ait teknik özellikler Tablo 3’te, buhar kazanlarına ait etiket bilgileri ise Tablo 4’de verilmiştir. Ayrıca, sistemlerin çalışma prensiplerini ve ekipman bağlantılarını gösteren Sıcak Su Sistem Şeması ve Buhar Sistem Şeması sırasıyla Şekil 42 ve Şekil 43’te gösterilmiştir. Bu tablolar ve şekiller, tesisin mevcut durumu ile enerji verimliliği analizlerinde temel veri olarak kullanılmıştır.

Tablo 3: Sıcak Su Kazanları Bilgileri

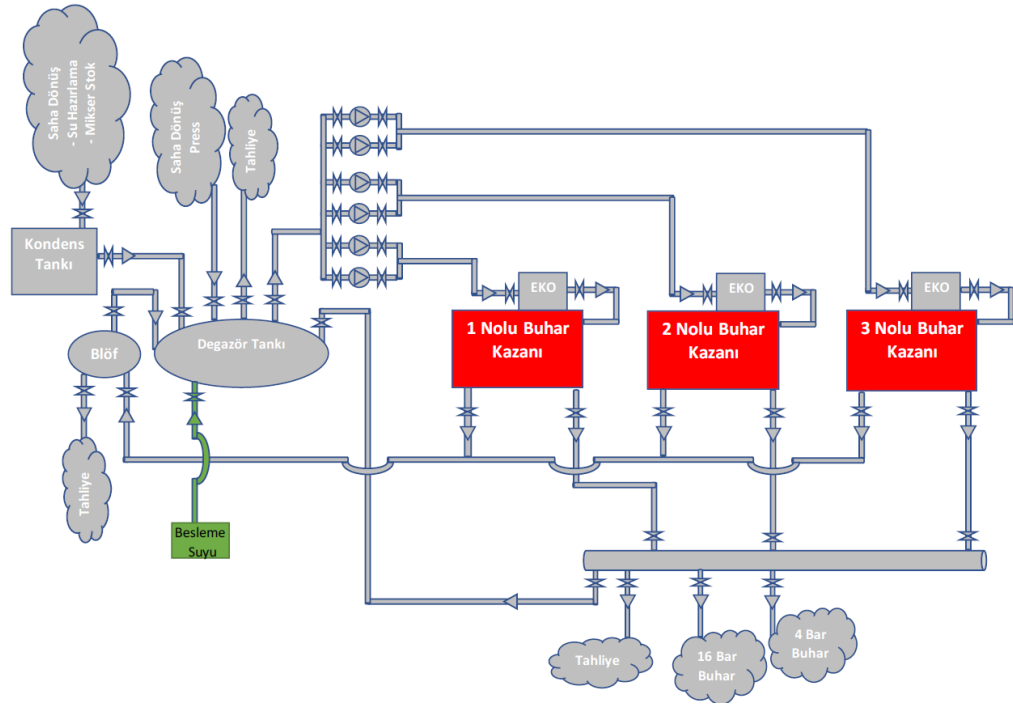
	BOSCH KAZAN-1	BOSCH KAZAN-2	BOSCH KAZAN-3
Kazan Modeli	UT-L 34	UT-L 42	UT-L 42
Kazan Kapasitesi	5200 kW/h	7700 kW/h	7700 kW/h
Kazan İşletme Basıncı	6 Bar		
Brülör Markası	Weishaupt		
Brülör Modeli	WM-G50/1-A	WM-G50/2-A	WM-G50/2-A
Brülör Kapasitesi	0,8-8 MW	1-11 MW	1-11 MW
Brülör Özelliği	Oransal		
Kazan Ekonomizer	Var		



Şekil 42: Sıcak Su Sistem Şeması

Tablo 4: Buhar Kazanları Bilgileri

	BOSCH KAZAN-1	BOSCH KAZAN-2	BOSCH KAZAN-3
Kazan Modeli	UL-S 5000	UL-S 5000	UL-S 5000
Kazan Kapasitesi	5681 kW/h		
Kazan İşletme Basıncı	24 Bar		
Brülör Markası	Weishaupt		
Brülör Modeli	WM-G30/3-A		
Brülör Kapasitesi	0,6-6,4 MW		
Brülör Özelliği	Oransal		
Kazan Ekonomizer	Var		

**Şekil 43:** Buhar Sistem Şeması

Tesiste bulunan kazanlar detaylı olarak incelenmiş, her bir kazana ait baca gazı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda kazanların yanma verimleri, baca gazı sıcaklıkları ve emisyon değerleri belirlenmiştir. Bu ölçümler, sistemlerin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi açısından önemli veriler sağlamaktadır. Sıcak su kazanlarında ve buhar kazanlarında yapılan ölçüm sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiş olup, elde edilen değerler sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da sunulmuştur. Ayrıca, yapılan ölçüm çalışmalarına ilişkin görseller Şekil 44'te gösterilmiştir.



Şekil 44: Sıcak Su ve Buhar Kazanları Baca Gazı Ölçümleri

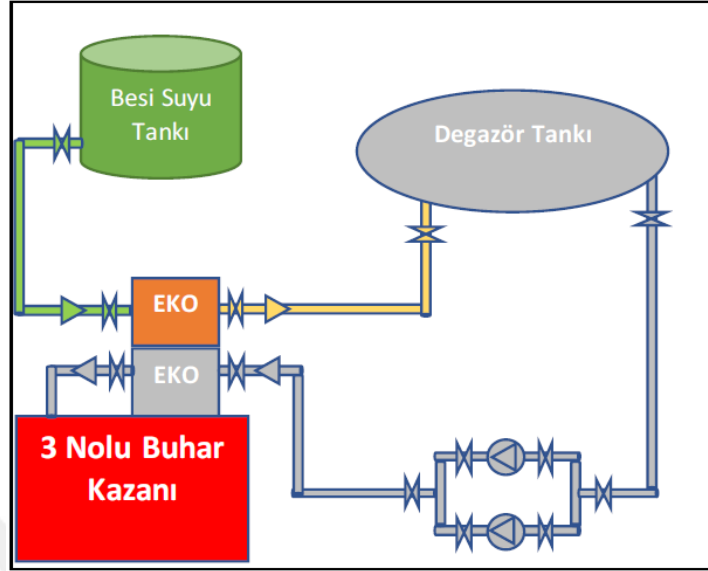
Tablo 5: Sıcak Su Kazanları Baca Gazı Ölçüm Değerleri

	1 Nolu Sıcak Su Kazanı	2 Nolu Sıcak Su Kazanı	3 Nolu Sıcak Su Kazanı
Baca Gazı Analizi			
TB (°C)	104,5	73,3	64,4
O ₂ (%)	2,6	2,6	3,4
CO (ppm)	63	17	4
Yanma Verimi (%)	96,80	98,1	98,5
TO (°C)	31,1	31,1	31,1

Tablo 6: Buhar Kazanları Baca Gazı Ölçüm Değerleri

	1 Nolu Sıcak Buhar Kazanı	2 Nolu Sıcak Buhar Kazanı	3 Nolu Sıcak Buhar Kazanı
Baca Gazı Analizi			
TB (°C)	-	122,9	113,2
O ₂ (%)	-	3,8	4,2
CO (ppm)	-	0	0
Yanma Verimi (%)	-	95,9	96,1
TO (°C)	-	31	31
Hız (m/s)	-	1,3	1,6

1 nolu buhar kazanında uygun branşman olmadığından baca gazı ölçümü yapılamamıştır. Buhar kazanları ekonomizer çıkışında baca gazı ölçümü yapılmış olup buradaki sıcaklığın 90 °C'ye düşürülerek besi suyu ön ısıtma yapılması düşünülmüştür.



Şekil 45: Uygulama Sonrası Sistem Şeması

Tesiste kış ayları ve geçiş mevsimlerinde sıcak su kazanı devreye alınarak sıcak su elde edilmektedir. Kompresörler ve tesiste soğutma suyu ihtiyacı için çalışan soğutma kuleleri bulunmaktadır.

2.2.1.2. Isı pompası

Tesiste mevcut sistemde ısı pompası uygulaması yapılarak, kış aylarında ve geçiş mevsimlerinde ihtiyaca göre soğutma suyu ve sıcak su gereksinimlerinin bir kısmının karşılanması hedeflenmiştir. Bu uygulama ile sistemin enerji verimliliği artırılmakta, klasik yakıtlı kazan sistemine olan bağımlılık azaltılmaktadır.

Isı pompası, sıcak su kazanlarının çalışma zamanlarına bağlı olarak devreye alınacak şekilde planlanmıştır. 2021 yılına ait fabrika verileri kullanılarak, sistemin çalışma senaryoları ve enerji hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Sıcak su ihtiyacının ısı pompası kapasitesinin üzerinde olduğu durumlarda, sıcak su kazanlarından destek alınacak; soğutma ihtiyacının ısı pompası kapasitesinin üzerinde olduğu durumlarda ise soğutma kuleleri devreye girecektir.

Soğutma kuleleri sistemin önemli bir parçası olup, fan motorlarının çektiği toplam güç $8,4 \text{ kW} + 11,2 \text{ kW} = 19,6 \text{ kW}$ olarak belirlenmiştir. Sıcak su üretiminde kullanılan kazan verimi ise yapılan kabul kapsamında %95 (0,95) olarak alınmıştır.

Soğutma kulelerine ait debi ve giriş-çıkış suyu sıcaklık farkı verileri, tesis otomasyon sistemi üzerinden elde edilmiştir. Ortalama 21,1 °C sıcaklıkta suyun fiziksel özellikleri, yoğunluk (ρ) = 997,4 kg/m³ ve özgül ısı kapasitesi (C_p) = 4,179 kJ/kg·°C olarak alınmıştır.

Soğutma kulelerinin aylık kapasite hesaplamaları, aşağıdaki denklem kullanılarak yapılmıştır:

$$Q = (V \times \rho) \times C_p \times \Delta T$$

Bu bağıntı ile her ay için soğutma kulesi ısı atma kapasitesi belirlenmiş, elde edilen değerler ısı pompası sisteminin çalışma analizinde kullanılmıştır. Böylece, sistemin ısıtma-soğutma yük paylaşımı ve hibrit çalışma verimliliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ısı pompası, yüksek enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik amaçları doğrultusunda seçilmiştir. RTWF 105 HSE model su kaynaklı ısı pompası, R1234ze tipi çevre dostu soğutucu akışkan kullanmakta olup vidalı kompresör yapısına sahiptir. Cihazın teknik özellikleri ve performans değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 46: Sistemde Kullanılan Isı Pompası Örneği

Tablo 7: Isı Pompası Özellikleri

Cihaz Modeli	RTWF 105 HSE
Cihaz Adedi	3
Kond. Giriş Sıcaklığı (°C)	55
Kond. Çıkış Sıcaklığı (°C)	65
Isıtma Kapasitesi (kW)	652,59
Evap. Giriş Sıcaklığı (°C)	30
Evap. Çıkış Sıcaklığı (°C)	25
Soğutma Kapasitesi (kW)	502,45
Kompresör Adedi	2
Kompresör Tipi	Vidalı
Elektriksel Güç (kW)	153,97
İnvertör Durumu	VAR
Soğutucu Gaz Tipi	R1234ze
COP - %100	4,29
EER - %100	3,32
COP - %75-80	4,36*
EER - %75-80	3,57**
COP - %50	4,47*
EER - %50	3,89**
IPLV/IP	(%100/75/25) 4,59 / 5,24 / 6,70
SEER / η_s	5,63
Teklif Toplam Isıtma Kapasitesi (kW)	1957,77
Teklif Toplam Soğutma Kapasitesi (kW)	1507,35

Tablo 8: Isı Pompası Kazanç Hesabı

Tarih	Kule- 1		Kule- 2		Çalışma Saati	Soğutma Kapasitesi (kW)	Isıtma Kapasitesi (kW)	Isı Pompası Soğutma Kapasitesi (kW)	Isı Pompası Isıtma Kapasitesi (kW)	Elektrik Kazancı (kWh)	Doğalgaz Kazancı (kWh)	Isı Pompası Enerji Tüketimi (kW)
	Debi (m³/h)	Giriş-Çıkış Sıcaklık Farkı (°C)	Debi (m³/h)	Giriş-Çıkış Sıcaklık Farkı (°C)								
Ağustos 21	206	4,07	198	1,78	744	1.378,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Eylül 21	216	3,86	205	2,05	720	1.451,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ekim 21	211	3,87	221	1,81	744	1.408,57	446,94	372,45	446,94	3.855,82	350.024,59	69.275,70
Kasım 21	203	3,79	397	0,96	720	1.332,05	1.604,64	1.332,05	1.598,46	14.112,0	1.211.464,42	239.769,00
Aralık 21	207	3,59	360	0,96	744	1.260,55	2.895,37	1.260,55	1.512,66	14.582,40	1.184.651,62	234.462,30
Ocak 22	206	3,47	349	1,00	720	1.231,71	3.500,96	1.231,71	1.478,05	14.112,00	1.120.207,83	221.707,80
Şubat 22	214	3,68	342	1,01	672	1.311,74	3.588,54	1.311,74	1.574,09	13.171,20	1.113.460,14	220.372,32
Mart 22	214	3,77	345	1,01	744	1.337,54	2.211,54	1.337,54	1.605,05	14.582,40	1.257.006,01	248.782,44
Nisan 22	212	3,87	339	1,09	720	1.377,74	727,59	606,33	727,59	6.210,49	551.436,63	109.138,50
Mayıs 22	194	3,69	320	1,29	744	1.306,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haziran 22	162	3,83	331	1,26	720	1.201,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temmuz 22	194	4,20	382	2,10	744	1.872,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
								Enerji Kazancı		80.626,32	6.788.251	1.343.508,06
								Mali Kazanç		₺255.585	₺9.707.199	₺4.258.920,55
								Toplam Mali Kazanç		₺5.703.864,16		

Tablo 9: Isı Pompası Uygulama Kapsamında Enerji Değerleri

Uygulaması Yapılacak VAP	Enerji Kaynağı	Tasarruf Miktarı				Emisyon Azaltımı	Öngörülen Uygulama Bedeli	Geri Ödeme Süresi
		Orijinal Birim	Miktar/ Yıl	TEP/ Yıl	TL/ Yıl	Ton.C O ₂ - e/Yıl	TL	Yıl
Isı Pompası Uygulama	D.gaz Elektrik	kWh	$\frac{6.788.251,25}{-1.262.881,74}$	475,18	5.703.864,1	797,89	13.750.000	2,41

Tablodan elde edilen sonuçlara göre uygulama kapsamında ısı pompası sistemi devreye alındığında, yıllık 6.788.251,25 kWh doğalgaz tasarrufu sağlanmakta ve bu değer yaklaşık 475,18 TEP'e karşılık gelmektedir. Ancak sistemin çalışması için ek olarak 1.262.881,74 kWh elektrik tüketilmektedir. Bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi sonucunda yıllık net 5.703.864,16 TL mali kazanç elde edilmektedir. Ayrıca doğalgaz tüketiminde meydana gelen düşüş sayesinde yıllık 797,89 ton CO₂-e emisyon azaltımı gerçekleşmektedir. Uygulamanın yatırım maliyeti yaklaşık 13.750.000 TL olup, sağlanan net tasarruf dikkate alındığında geri ödeme süresi 2,41 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ısı pompası uygulamasının hem ekonomik açıdan avantajlı hem de çevresel faydası yüksek bir enerji verimliliği önlemi olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde Tablo 10'da verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 10: Elde Edilen Enerji Kazançları

Elektrik Kazancı	80.626,32 kWh/Yıl
Doğalgaz Kazancı	6.788.251,25 kWh/Yıl
Yeni Durumda Elektrik Tüketimi	1.343.508,06 kWh/Yıl
Toplam Mali Kazanç	$[(80.626,32 \cdot 3,17) + (6.788.251,25 \cdot 1,43)] - (1.343.508,06 \cdot 3,17) = 5.703.864,16 \text{ TL/Yıl}$

Tablo 10'da ısı pompası uygulamasına ilişkin aylık bazda elde edilen enerji ve mali kazanımlar gösterilmektedir. Kule-1 ve Kule-2 sistemlerine ait debi ve giriş-çıkış sıcaklık farkları üzerinden hesaplanan değerler doğrultusunda, ısı pompasının aylık soğutma ve ısıtma kapasiteleri belirlenmiştir. Bu kapasitelerden yola çıkarak elektrik ve doğalgaz kazançları ile ısı pompasının enerji tüketimleri hesaplanmış ve enerji performansı ortaya konulmuştur. Analiz

sonuçlarına göre, sistemin yıllık toplam 6.788.251,25 kWh doğalgaz tasarrufu sağladığı, buna karşılık 1.343.508,06 kWh elektrik tükettiği tespit edilmiştir. Yıllık bazda 80.626,32 kWh elektrik kazancı da dikkate alındığında, uygulamanın net 5.703.864,16 TL mali kazanç sağladığı görülmektedir. Bu bulgular, ısı pompası uygulamasının enerji verimliliği açısından yüksek potansiyel sunduğunu ve ekonomik olarak uygulanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

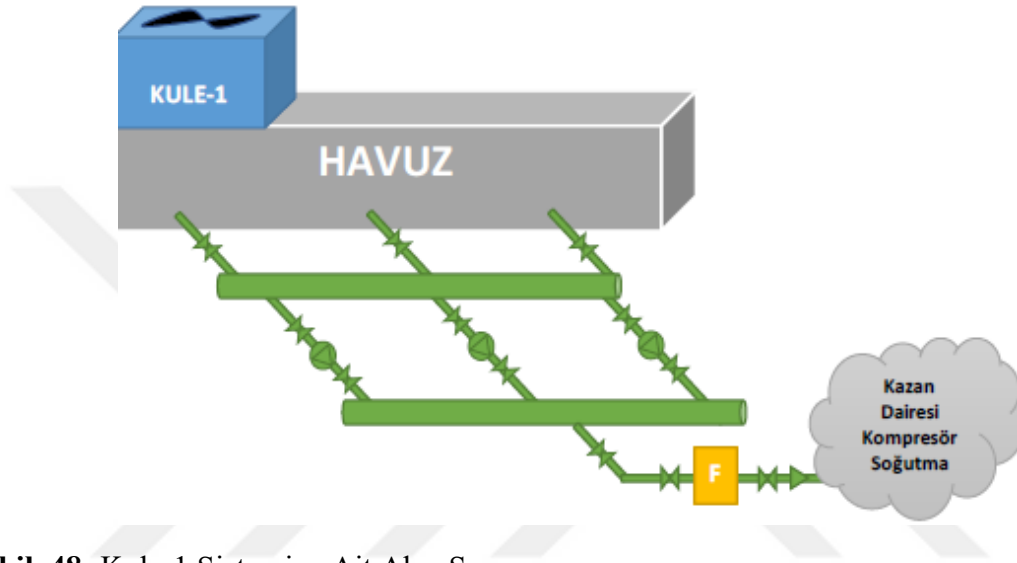
2.2.1.3. Soğutma kulesi

Tesisin soğutma ihtiyacının karşılanmasında önemli bir role sahip olan soğutma kuleleri, işletmenin proses ve yardımcı sistemlerinde sürekli olarak görev yapmaktadır. Tesiste 2 adet soğutma kulesi bulunmaktadır. Kuleler, işletmenin ve yardımcı tesislerdeki kompresörlerin soğuk su ihtiyacını karşılamaktadır. Kuleler açık tipte olup, kule fanları sıcaklığa bağlı olarak on/off prensibinde, 18 °C ile 24 °C arasında kontrollü şekilde çalışmaktadır. Ayrıca, sirkülasyon pompaları üzerinde de frekans sürücüleri bulunmakta olup, farklı Hz değerlerinde çalıştıkları bilgisi pano üzerinden alınmıştır. Tesiste bulunan soğutma kuleleri ve bağlantılarına ait görseller Şekil 47’de verilmiştir.

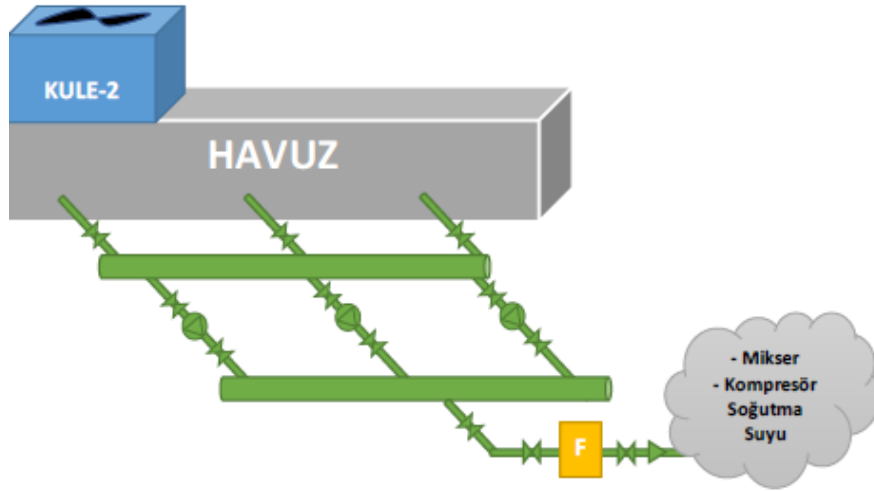


Şekil 47: Tesiste Bulunan Soğutma Kulesi ve Bağlantı

Fabrika bünyesinde yer alan iki adet soğutma kulesi farklı bölgelerin soğutma ihtiyacını karşılamaktadır. 1 No'lu soğutma kulesi, kazan dairesinde bulunan kompresörler ve kurutucuların soğuk su ihtiyacını karşılamakta; 2 No'lu soğutma kulesi ise işletme ve hammadde deposunda bulunan kompresörün soğutma yükünü sağlamaktadır. Her iki soğutma kulesinin sistemle olan etkileşimini ve işleyişini açıklamak amacıyla, aşağıda sistem şemalarını gösteren animasyon görselleri sunulmuştur. Bu görseller, fabrikanın mevcut ısıtma-soğutma altyapısının bütünsel yapısını ve ısı pompası ile olan entegrasyon ilişkisini daha anlaşılır biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 48: Kule-1 Sisteminin Akış Şeması



Şekil 49: Kule-2 Sisteminin Akış Şeması

Kule-1, kazan dairesinde yer alan kompresörlerin soğutulması amacıyla kullanılmaktadır. Havuzdan alınan su, sistem üzerinden kompresör soğutma hattına yönlendirilmekte ve burada gerçekleşen ısı transferi sonucunda ısınan su yeniden kuleye dönmektedir. Bu çevrim, kazan dairesinde bulunan ekipmanların optimum sıcaklıkta

çalışmasını sağlayarak enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır.

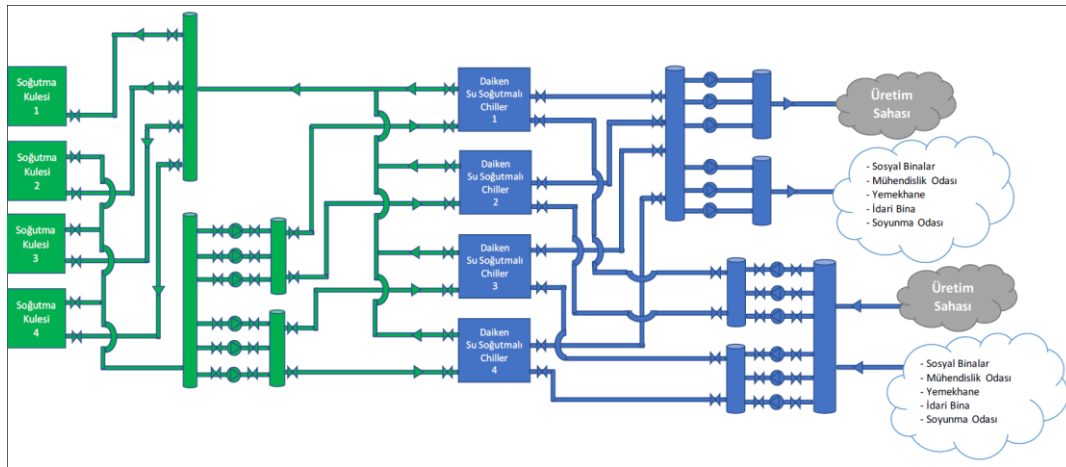
Kule-2, işletme ve hammadde deposunda bulunan kompresörlerin ve mikser sistemlerinin soğutulması amacıyla çalışmaktadır. Havuz aracılığıyla dolaşan soğutma suyu, ilgili proses ekipmanlarında ısı yükü olarak kuleye geri dönmekte ve bu sayede tesisin üretim alanlarında kararlı bir ısı denge sağlanmaktadır.

Tesiste konfor amaçlı 4 adet Daikin marka santrifüj chiller ve bu chillere ait soğutma kuleleri bulunmaktadır. Dört adet chillerden bir tanesi yalnızca yaz aylarında devreye alınmakta, diğer üçü ise yılın farklı dönemlerinde sistem ihtiyacına göre çalıştırılmaktadır. Her bir chiller için bir adet soğutma kulesi görev yapmakta olup, sistem bu şekilde bağımsız ve verimli bir şekilde işletilmektedir. Bu sistemin genel yerleşimi ve bağlantı düzeni Şekil 50’de görsel olarak verilmiştir.



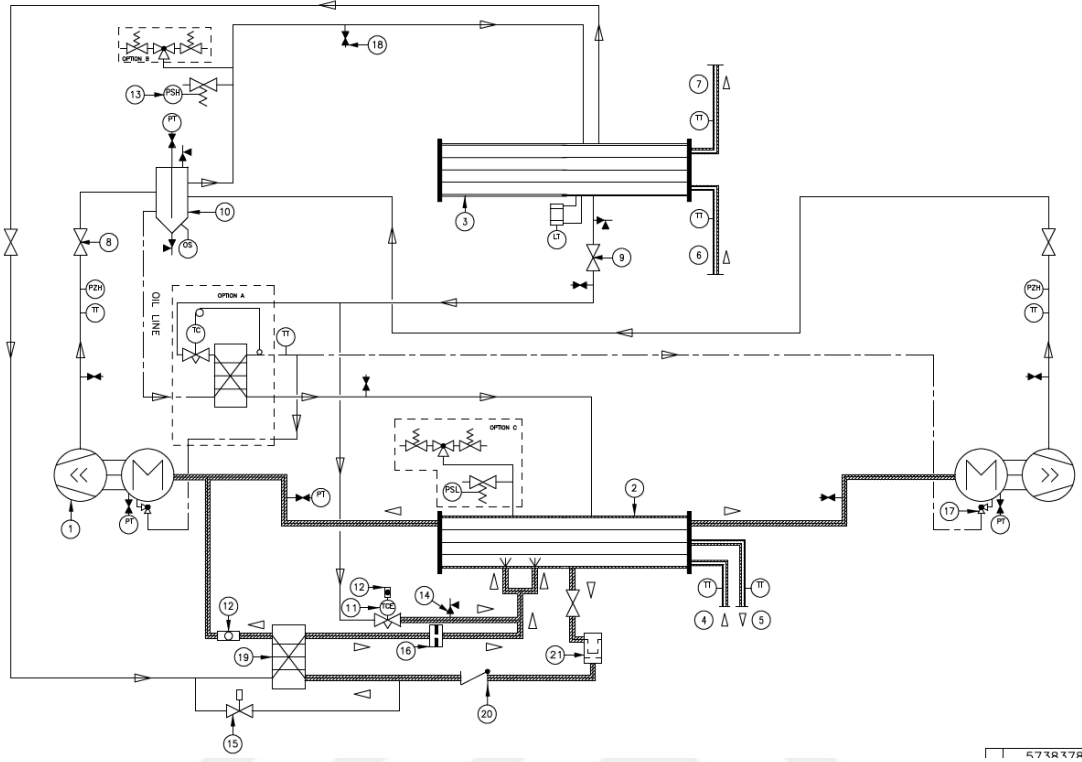
Şekil 50: Konfor Chiller

Santrifüj chiller sistemi, tesisin farklı bölümlerine soğutma suyu sağlayarak sosyal binalar, mühendislik odası, yemekhane, idari bina, soyunma odaları ve lastik imal bölümü klima santrallerinin soğutma ihtiyacını karşılamaktadır. Sistemin genel yapısı, soğutma kulelerinden chiller ünitelerine ve oradan bina içi kullanım alanlarına kadar olan su akışını göstermekte olup, bu bağlantı düzeni Şekil 51’de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 51: Konfor Chiller Sistem Şeması

Tesiste 2 adet soğutma kulesi bulunmaktadır. Soğutma kulelerine ait 1 yıllık debi ile giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır.



Şekil 52: Tesiste Kullanılan Soğutma Sistemine Ait Akış Diyagramı

Yukarıda verilen Şekilde tesiste kullanılan soğutma sistemine ait akış diyagramı görülmektedir. Tesiste kullanılan soğutma sistemi akış diyagramı, sistemde yer alan tüm mekanik ve otomasyon bileşenlerini göstermektedir. Bu diyagramda; vidalı kompresör (screw compressor), evaporatör, su soğutmalı kondenser, yağ ayırıcı (oil separator), genleşme valfleri, çek valfler, filtreler ve kontrol vanaları gibi temel ekipmanlar numaralandırılarak tanımlanmıştır.

Ayrıca sistemdeki basınç, sıcaklık, seviye ve akış gibi temel proses parametrelerinin ölçümünde kullanılan sensör ve göstergeler de sembollerle belirtilmiştir. Bu elemanlar arasında; basınç transmitterleri (PT), yüksek ve düşük basınç emniyet vanaları (PSH, PSL), sıcaklık sensörleri (TT), sıvı seviye göstergesi (LT), optik sensör (OS) ve elektrikli genleşme valfi (TCE) bulunmaktadır.

Diyagramın alt kısmında hat tipleri de tanımlanmıştır. Refrigerant line (soğutucu akışkan hattı), oil line (yağ hattı), chilled/heated water line (soğutulmuş veya ısıtılmış su hattı) ve insulation (izolasyon) sembolleri, sistemin farklı akış yollarını ve devrelerini ayırt etmeyi kolaylaştırmaktadır. Bu diyagram, sistemin mekanik bileşenleri, kontrol elemanları ve akış

hatları arasındaki ilişkiyi bütüncül olarak göstermekte; tesisin soğutma devresinin çalışma prensibini açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

Soğutma kulelerine gelen su;

Tesisteki soğutma kuleleri, kompresörlerin, chillerlerin ve ısı pompasının ısı yüklerini dengelemek amacıyla çalışan sistemin önemli bir parçasıdır. Üretim sürecinde su soğutmalı vidalı kompresörler ve santrifüj chiller sistemleri, çalışma sırasında ısınan soğutma suyunu devreye geri gönderir. Bu ekipmanlarda dolaşan su, bünyesine aldığı ısıyı boru hatları aracılığıyla soğutma kulelerine taşır.

Kuleye gelen bu ısınmış su, kule içinde hava ile temas ederek buharlaşma yoluyla enerjisini ortama bırakır. Buharlaşma ve ısı transferi sonucunda suyun sıcaklığı düşer, soğuyan su kule tabanında toplanır ve tekrar sistem devresine gönderilir. Böylece kompresör, chiller ve ısı pompası arasında kapalı çevrimli bir ısı transfer döngüsü sağlanır.

Hibrit sistemin bir parçası olarak, kış aylarında ve geçiş mevsimlerinde ısı pompası devreye alınmaktadır. Isı pompasının kondenser devresinden çıkan su, aynı soğutma suyu hattına entegre edilmiştir. Bu sayede ısı pompası, fazla ısınıp soğutma kulesine atabilmekte veya sıcak su hattına destek sağlayabilmektedir.

Bu sistem yapısı sayesinde enerji verimliliği artırılmış, atık ısı geri kazanımı sağlanmış ve sıcak su kazanlarının devreye girme süreleri azaltılmıştır. Sonuç olarak hem yakıt tüketiminde hem de işletme maliyetlerinde önemli iyileştirmeler elde edilmiştir.

2.2.1.4. Basınçlı hava sistemleri

Tesis genelinde 7 adet basınçlı hava kompresörü bulunmaktadır. Bunlardan 5 adedi Ingersoll Rand marka su soğutmalı yağsız vidalı, 1 adedi Ingersoll Rand marka hava soğutmalı yağsız vidalı ve 1 adedi Atlas Copco marka su soğutmalı yağsız vidalı kompresördür. Kompresörlere ait hava kurutucu sistemleri incelendiğinde; 5 adet Ingersoll Rand kompresöre bağlı 4 adet hava kurutucu, enstrüman havası için 1 adet bağımsız hava kurutucu ve Atlas Copco kompresöre entegre 1 adet hava kurutucu bulunduğu belirlenmiştir.

Kompresörlerden 6 tanesi inverter kontrollü, 1 tanesi ise yıldız-üçgen (Y- Δ) olarak devreye girmekte ve on/off prensibiyle çalışmaktadır. Ingersoll Rand marka 5 kompresörden 2 adedi 6 bar, 2 adedi 9 bar basınçlı hava hattına hizmet etmekte, 1 adedi ise bakımda bulunmuştur. Bu kompresörler, ihtiyaca göre 6 bar veya 9 bar hattına yönlendirilebilmektedir.

Hava soğutmalı Ingersoll Rand kompresör azot üretiminde kullanılmakta, Atlas Copco marka kompresör ise depo ve mikser bölümlerinin basınçlı hava ihtiyacını karşılamaktadır.

Tesiste kullanılan kompresörler genel olarak su soğutmalı tipte olup, çalışma sırasında oluşan ısıнын uzaklaştırılması amacıyla soğutma kuleleriyle entegre şekilde çalışmaktadır. Kompresörlerin kondenser kısmında dolaşan su, kulelerde soğutularak sisteme geri gönderilmekte ve böylece sürekli bir ısı transfer döngüsü sağlanmaktadır. Bu yapı, sistemin yüksek verimle çalışmasını ve ekipmanların aşırı ısınmadan korunmasını sağlamaktadır.

Ayrıca sistemde, hidrolik ekipmanlar ve yağ devreleri de yer almakta olup, bu devrelerdeki akışkan sıcaklığı özel olarak tasarlanmış soğutma devreleri aracılığıyla kontrol edilmektedir. Böylece sistemin genel kararlılığı ve enerji verimliliği korunmaktadır. Kompresör sistemi ile soğutma kulesi arasındaki bağlantı yapısı Şekil 53'te gösterilmiştir.

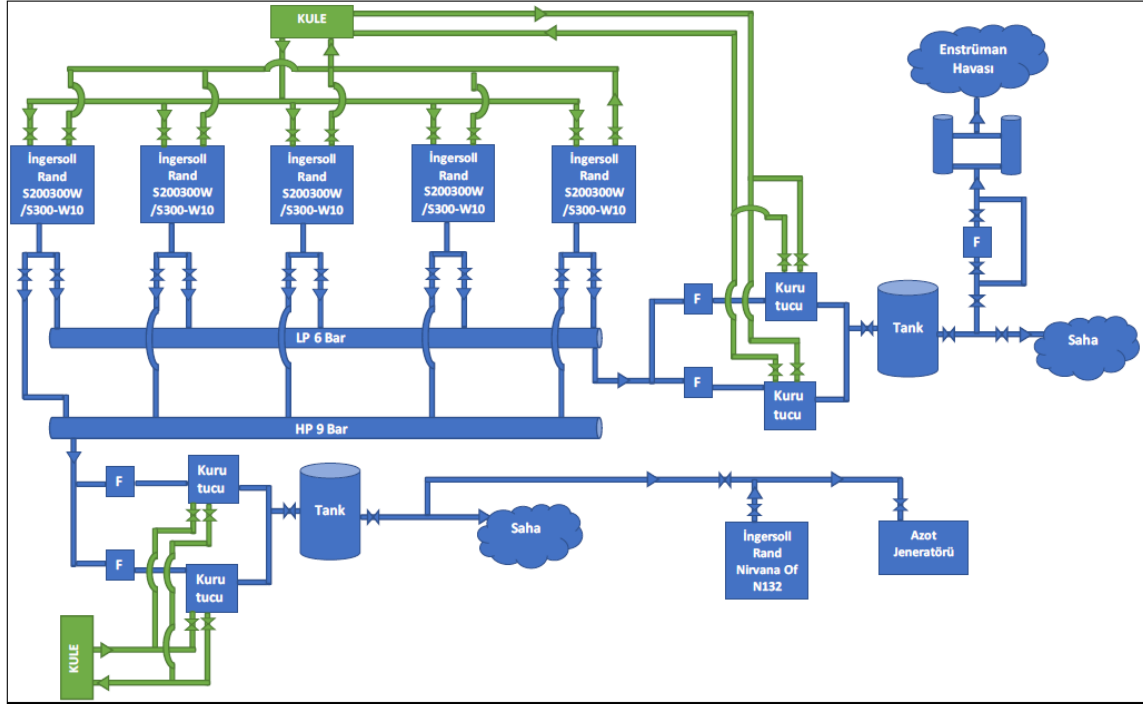


Şekil 53: Tesisteki Basınçlı Hava Sistemi

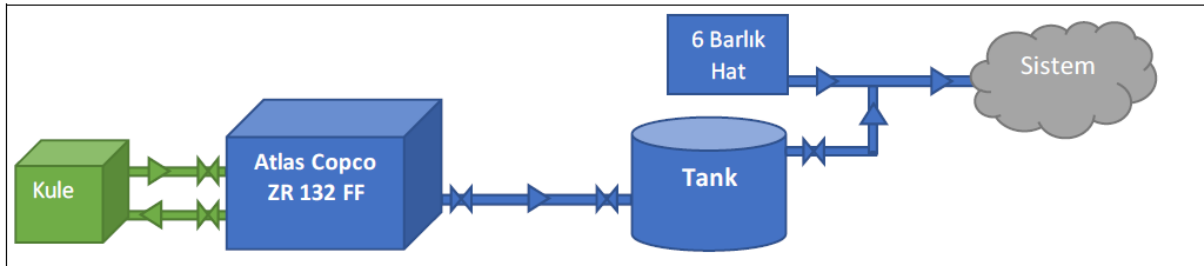
Tesisteki basınçlı hava sisteminin enerji performansını değerlendirmek amacıyla, farklı basınç seviyelerinde çalışan kompresörler üzerinde eş zamanlı enerji ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 6 barlık hatta bağlı kompresörlere, 9 barlık hatta bağlı kompresörlere ve depo bölümünde bulunan Atlas Copco marka kompresöre ayrı ayrı birer günlük enerji analizörleri bağlanarak kayıt alınmıştır. Elde edilen veriler, kompresörlerin elektriksel enerji tüketimlerini, çalışma sürelerini ve yük-boşta oranlarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Böylece, sistemin genel enerji verimliliği ve çalışma dengesi analiz edilmiştir.

Tesisteki kompresörler, farklı hat basınçlarına göre gruplandırılmıştır. 6 barlık hatta hizmet veren kompresörler, işletmenin genel üretim süreçlerinde kullanılan basınçlı hava ihtiyacını karşılarken; 9 barlık hatta bağlı olan kompresörler, daha yüksek basınç gerektiren hatlarda kullanılmaktadır. Atlas Copco marka kompresör ise depo ve mikser bölümlerinin basınçlı hava gereksinimlerini karşılamakta olup, 6 barlık ana hat üzerinden sisteme entegre edilmiştir.

Kompresör sisteminin genel yerleşimi, soğutma kuleleriyle olan su devresi bağlantılarını, hava kurutucu sistemlerini, basınçlı hava tanklarını ve hat ayrımlarını göstermekte olup, sistemin tamamı Şekil 54 ve Şekil 55'te şematik olarak verilmiştir. Bu şemalar, kompresörlerin soğutma ve basınçlı hava hatlarına göre nasıl konumlandırıldığını ve işletme genelinde enerji akışının nasıl gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 54: Kompresör Sisteminin Genel Yerleşimi

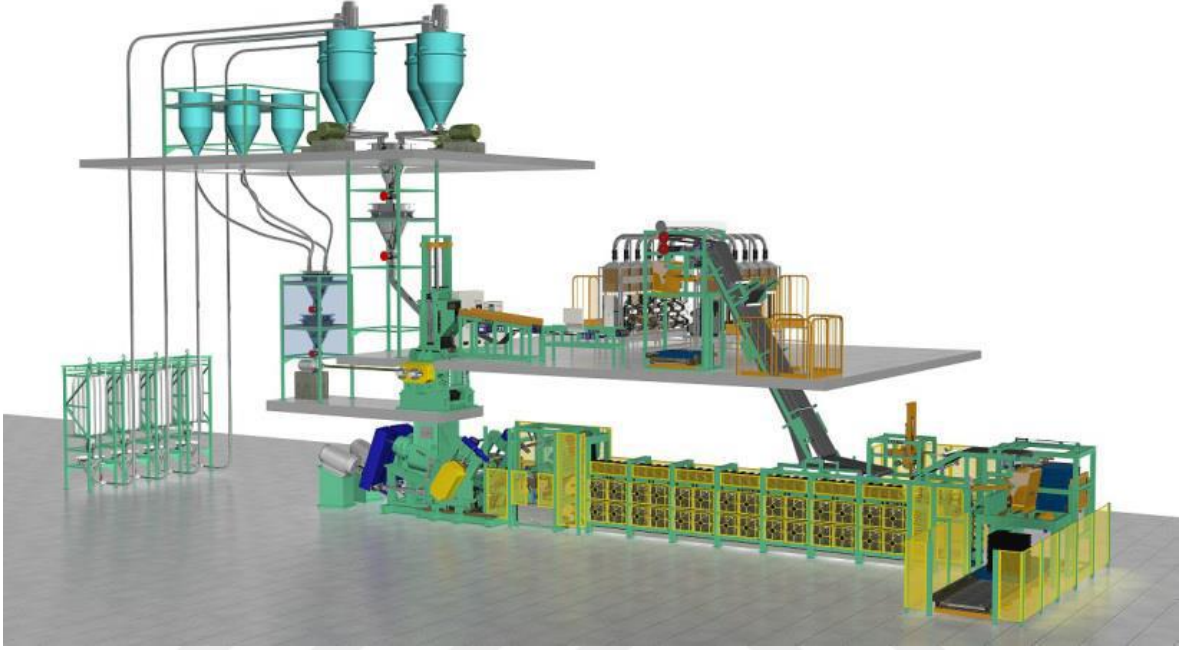


Şekil 55: Kule Sistem Bağlantı Şeması

2.1.1.5. Tesisin genel işleyişi ve enerji sistemleri

Çalışmanın yürütüldüğü tesis, lastik üretim proseslerinin temel aşamalarını içeren bir endüstriyel üretim işletmesidir. Tesiste, renklendiriciler, kimyasal katkıları ve farklı türde kauçuk hammaddeler, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalışan Banbury tipi mikser makinelerinde homojen bir şekilde karıştırılmaktadır. Bu işlem sonucunda, çeşitli katkıların karışımıyla siyah, sakızımsı ve yoğun viskoziteli bir kauçuk bileşimi elde edilmektedir.

Tesis bünyesinde 2 ve 3 numaralı olmak üzere iki adet mikser makinesi aktif olarak çalışmakta, 1 numaralı mikser makinesi ise kurulum aşamasındadır. Her bir mikser hattı, bir ana motor, bir kalender motoru ve bir ekstruder motorundan oluşmaktadır. Ana motorun devreye girmesiyle birlikte hidrolik sistemler de eş zamanlı olarak çalışmakta ve bu sistemlerin soğutma ihtiyacı soğutma kulelerinden gelen su ile karşılanmaktadır.



Şekil 56: Mixer Ünitesi Örnek Resim

Üretim sürecinde günde 2-3 defa sabun hazırlığı yapılmakta; ilk sabun hazırlığı sırasında sıcak su sistemi devreye alınarak prosesin başlangıç sıcaklığı sağlanmaktadır. Üretim sırasında konveyör motorları üzerinde yer alan fan sistemleri zamana bağlı olarak otomatik şekilde devreye girip kapanmaktadır. Hammaddeler depo alanlarından mikser hatlarına taşınmakta, tartım konveyörlerinde gerekli harman miktarı hazırlanarak ana mikser motoru vasıtasıyla belirli sıcaklık ve basınç koşullarında karıştırılmaktadır.

Mikserden çıkan yarı mamul ürün, ekstruder vidası aracılığıyla kalendere iletilmekte, burada vals motorları sayesinde yoğrularak şekil kazanmaktadır. Ürün daha sonra kurutma tünellerinde fan destekli sistemlerle kurutulmakta ve en sonunda istifleme alanına alınarak sonraki üretim hatlarına (Ekstruder ve Kalender bölümleri) yönlendirilmektedir.

Mikser ve hammadde depo alanlarında bulunan aparey sistemleri, ortam ısısının kontrolünde kullanılmaktadır. Bu apareyler, kazan dairesinden gelen sıcak su ile beslenmektedir. Böylece, üretim sürecinin hem sıcaklık hem de nem dengesi korunmakta, prosesin sürekliliği sağlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, tesiste yer alan ısı pompası, soğutma kulesi ve kazan sistemleri bir bütün olarak değerlendirilmiştir. Bu üç sistemin hibrit biçimde birlikte çalışmasıyla, hem ısıtma hem de soğutma ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Sistemin bu şekilde bütünleştirilmesi, enerji verimliliğini artırmak, atık ısı geri kazanımını sağlamak ve işletme maliyetlerini azaltmak açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

2.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN CİHAZLAR VE ALINAN ÖLÇÜMLER

Çalışmada enerji tüketen kaynakların incelenmesi ve potansiyel imkânlarının tespit edilebilmesi amacıyla çeşitli ölçümler yapılmıştır. Buhar kazanlarının yanma verimleri ve baca gazı debileri baca gazı analiz cihazı ve pitot tüp ile ölçülmüştür. Tesisteki motorların, kompresörlerin ve pompaların çektikleri güçler enerji analizörleri ile ölçülmüştür. Pompalarda debi ölçümü ultrasonik debimetre cihazı ile yapılmıştır. Tüm yapılan bu ölçüm cihazlarının ve bu cihazların kalibrasyon durumları aşağıdaki resimler ve açıklamaları ile verilmiştir.

Baca Gazı Analiz Cihazı

Bu projede, doğalgazlı buhar ve sıcak su kazanlarının yanma performansının değerlendirilmesi amacıyla baca gazı analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz; yanma sonucu oluşan temel baca gazı bileşenlerini (CO , CO_2 , O_2 , NO_x vb.) ölçerek kazanların yanma veriminin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Böylece yakıt tüketiminin optimize edilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel emisyonların azaltılması hedeflenmiştir. Şekil 57’de kullanılan baca gazı analiz cihazı örnek resmi verilmiştir.



Şekil 57: Baca Gazı Ölçüm Cihazı Örnek Görsel

Ultrasonik Debimetre

Bu projede, ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan pompaların taşıdığı akışkanın debisinin ölçülmesi amacıyla taşınabilir tip ultrasonik debimetre (G.E. PT 878) kullanılmıştır. Bu cihaz, akışkan ile temas etmeden boru dışından ölçüm yapabilmesi sayesinde prosese müdahale gerektirmeden hızlı ve güvenilir veri elde edilmesini sağlamıştır. Ultrasonik ölçüm prensibine göre çalışan cihaz, akışkanın akış hızı ve boru çapına bağlı olarak debi ve toplam

akış miktarı gibi parametreleri yüksek doğrulukla belirleyebilmektedir. Ultrasonik debimetre, proje kapsamında tesis içerisindeki pompaların debi ölçümleri için 1 yıl boyunca kullanılmıştır. Şekil 58’de kullanılan ultrasonik debimetre örnek cihaz görseli verilmiştir.



Şekil 58: Ultraonik Debimetre Cihazı Örnek Görsel

Pitot Tüp

Bu projede, doğalgazlı buhar ve sıcak su kazanlarının baca hatlarında akış hızı ve dinamik basınç ölçümlerinin yapılması için Testo 435-4 cihazı ile birlikte kullanılan pitot tüpü tercih edilmiştir. Pitot tüpü, baca içerisindeki akışkanın hız basıncını ve statik basıncını ölçerek baca gazı hızının ve dolayısıyla hacimsel debisinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Bu cihaz proje kapsamında doğalgazlı buhar ve sıcak su kazanlarının baca ölçümleri için 1 yıl süreyle kullanılmıştır. Şekil 59’da kullanılan pitot tüp örnek cihaz görseli verilmiştir.



Şekil 59: Pitot Tüp Örnek Cihaz Görseli

Elektrik Enerjisi Analizörü

Bu projede, motor sistemleri ve kompresörlerin elektriksel yük profillerinin belirlenmesi amacıyla Chauvin Arnoux 8333 model elektrik enerji analizörü kullanılmıştır. Cihaz, üç fazlı sistemlerde gerilim, akım, güç faktörü, aktif ve reaktif güç tüketimi gibi temel elektriksel

parametreleri yüksek hassasiyetle ölçmektedir. Ayrıca harmonik analiz kabiliyeti sayesinde, sistemde oluşabilecek harmonik bozulmaların enerji kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine imkân sağlamıştır. Bu cihaz, proje kapsamında motor sistemleri ve kompresörlerin enerji analizlerinin yapılması için 1 yıl boyunca kullanılmıştır. Şekil 60'ta kullanılan elektrik enerjisi analizörü örnek cihaz görseli verilmiştir.



Şekil 60: Elektrik Enerjisi Analizörü Örnek Cihaz Görseli

2.4. ARAŞTIRMACININ ROLÜ

Bu çalışmada araştırmacı, Aksaray ilinde faaliyet gösteren bir lastik fabrikasında yürütülen enerji verimliliği uygulamasına ait ölçüm, veri toplama ve analiz süreçlerinde aktif rol almıştır. Fabrikaya ait soğutma kuleleri ve ısı pompası sistemlerinden elde edilen debi, sıcaklık farkı ve çalışma saatleri gibi operasyonel veriler araştırmacı tarafından düzenli olarak temin edilmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen bu veriler kullanılarak ısı pompası uygulamasının enerji kazançları, maliyet analizleri ve emisyon azaltım hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, uygulamanın ekonomik fizibilitesi ve geri ödeme süresine ilişkin değerlendirmeler de araştırmacı tarafından yapılmıştır. Böylelikle çalışmanın saha uygulamaları, veri işleme aşamaları ve sonuçların yorumlanmasında araştırmacı doğrudan sorumluluk üstlenmiştir.

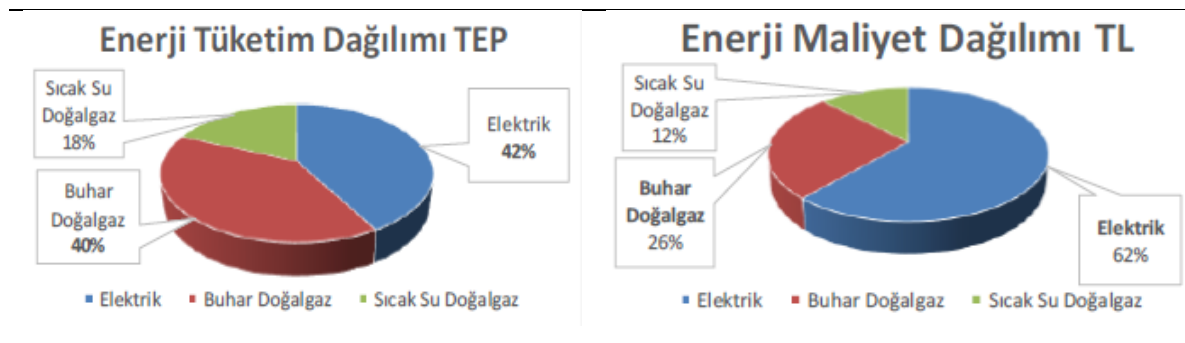
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, Aksaray ilinde yer alan bir lastik üretim tesisinde mevcut enerji altyapısının analiz edilmesi ve su kaynaklı ısı pompası (SKIP) uygulamasıyla enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Tesisin mevcut durumda enerji ihtiyacını büyük oranda doğalgaz ve elektrik ile karşıladığı, özellikle ısıtma ve soğutma sistemlerinin yıl boyunca eşzamanlı çalıştığı tespit edilmiştir. Bu durum, önemli miktarda atık ısının soğutma kuleleri aracılığıyla atmosfere atılmasına neden olmaktadır. 2020 ve 2021 yıllarına ait enerji tüketim ve maliyet dağılım tablosu aşağıdaki tablolar ve şekillerdeki grafiklerde verilmiştir.

Tablo 11: 2020 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Tablosu

Enerji Türü	Tüketim			Maliyet		Birim Maliyet
	Miktar	TEP	%Toplam	TL	%Toplam	TL/TEP
Elektrik	28.580.941,00kWh	2.458,36	41,81	90.601.582,97	61,43	36.854,42
Buhar	27.076.662,00kWh	2.328,97	39,60	38.719.626,66	26,25	16.625,18
Doğalgaz						
Sıcak Su	12.709.394,00 kWh	1.093,19	18,59	18.174.433,42	12,32	16.625,18
Doğalgaz						
TOPLAM		5.880,53	100	147.495.643,05	100	25.082,05



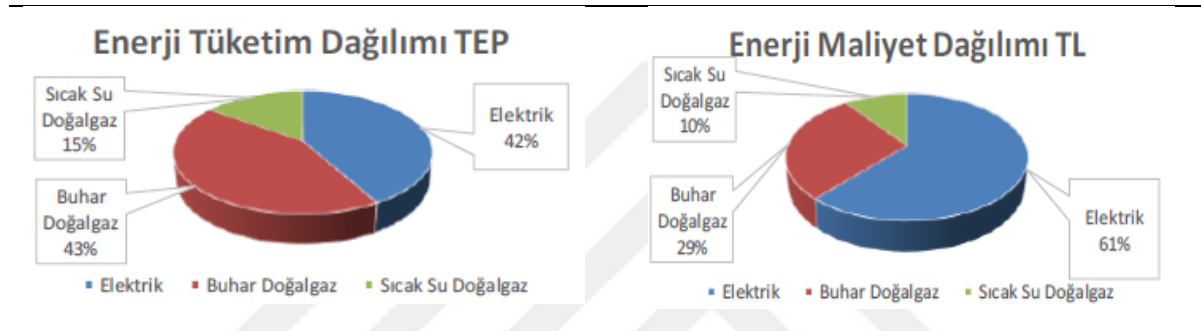
Şekil 61: 2020 Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılımı

Tesiste tüketilen enerjinin %42'lik bölümü elektriğe, %58'lik kısmı ise doğalgaza aittir. Parasal olarak da toplam enerji tüketim maliyeti içindeki en büyük pay elektrik tüketimine aittir. Bunun sebebi, elektrik birim maliyetinin doğalgaza göre yüksek oluşundandır. Elektrik tesiste ağırlıklı olarak AC ve DC motorlarda, basınçlı hava sisteminde, soğutma sistemlerinde ve azot üretim sisteminde kullanılmaktadır. Doğalgaz ise buhar ve sıcak su üretimi için

kullanılmaktadır. Buhar lastik preslerinde, pişirmede vb., sıcak su HVAC sistemlerinde kullanılmaktadır.

Tablo 12: 2021 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Tablosu

Enerji Türü	Tüketim			Maliyet		Birim Maliyet
	Miktar	TEP	%Toplam	TL	%Toplam	TL/TEP
Elektrik	31.346.708,40 kWh	2.696,26	41,9	99.369.066	61,5	36.854,42
Buhar	32.202.164,00 kWh	2.769,84	43	46.049.095	28,5	16.625,18
Doğalgaz						
Sıcak Su	11.308.893,00 kWh	972,72	15,1	16.171.717	10	16.625,18
Doğalgaz						
TOPLAM		6.438,82	100	161.589.877	100	25.096,18



Şekil 62: 2021 Yılı Enerji Tüketim ve Maliyet Dağılım Oranları

Tesiste tüketilen enerjinin %42'lik bölümü elektriğe, %58'lik kısmı ise doğalgaza aittir. Parasal olarak da toplam enerji tüketim maliyeti içindeki en büyük pay elektrik tüketimine aittir. Bunun sebebi, elektrik birim maliyetinin doğalgaza göre yüksek oluşundandır. Elektrik tesiste ağırlıklı olarak AC ve DC motorlarda, basınçlı hava sisteminde, soğutma sistemlerinde ve azot üretim sisteminde kullanılmaktadır. Doğalgaz ise buhar ve sıcak su üretimi için kullanılmaktadır. Buhar lastik preslerinde, pişirmede vb., sıcak su HVAC sistemlerinde kullanılmaktadır.

Endüstriyel tesislerde enerji tüketiminin yıllara göre takip edilmesi, işletmenin enerji performansının değerlendirilebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda işletmenin 2020 ve 2021 yıllarına ait elektrik enerjisi tüketim verileri analiz edilmiştir. Analiz edilen tüketim verileri, aylık bazda satın alınan elektrik miktarı, buna bağlı TEP (Ton Eşdeğer Petrol) dönüşümleri ve maliyet bileşenlerini içermektedir. Tabloların karşılaştırılmasıyla, yıllar içerisindeki enerji kullanım değişimleri, üretim hacmindeki dalgalanmalar ve mevsimsel etkiler ortaya çıkarılabilmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda işletmenin enerji yük profili belirlenmiştir. Elde edilen 2020 ve 2021 yıllarına ait elektrik tüketim tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 13: 2020 Yılı Elektrik Tüketim Tablosu

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	2.618.973,00	225,27	8.302.144,41	8.302.144,41
Şubat	2.435.076,00	209,45	7.719.190,92	7.719.190,92
Mart	2.065.618,80	177,67	6.548.011,60	6.548.011,60
Nisan	852.730,20	73,35	2.703.154,73	2.703.154,73
Mayıs	1.971.459,00	169,57	6.249.525,03	6.249.525,03
Haziran	2.615.382,00	224,96	8.290.760,94	8.290.760,94
Temmuz	2.700.054,00	232,24	8.559.171,18	8.559.171,18
Ağustos	2.776.393,00	238,81	8.801.165,81	8.801.165,81
Eylül	2.703.078,00	232,50	8.568.757,26	8.568.757,26
Ekim	2.551.311,00	219,45	8.087.655,87	8.087.655,87
Kasım	2.641.086,00	227,17	8.372.242,62	8.372.242,62
Aralık	2.649.780,00	227,92	8.399.802,60	8.399.802,60
Toplam	28.580.941,00	2.458,36	90.601.582,97	90.601.582,97

Tablo 14: 2021 Yılı Elektrik Tüketim Tablosu

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	2.672.082,00	229,84	8.470.499,94	8.470.499,94
Şubat	2.457.945,00	211,42	7.791.685,65	7.791.685,65
Mart	2.675.862,00	230,16	8.482.482,54	8.482.482,54
Nisan	2.505.006,00	215,47	7.940.869,02	7.940.869,02
Mayıs	2.573.424,00	221,35	8.157.754,08	8.157.754,08
Haziran	2.812.698,00	241,93	8.916.252,66	8.916.252,66
Temmuz	2.692.305,00	231,58	8.534.606,85	8.534.606,85
Ağustos	2.272.725,00	195,49	7.204.538,25	7.204.538,25
Eylül	2.675.106,00	230,10	8.480.086,02	8.480.086,02
Ekim	2.706.480,00	232,80	8.579.541,60	8.579.541,60
Kasım	2.649.269,70	227,87	8.398.184,95	8.398.184,95
Aralık	2.653.805,70	228,26	8.412.564,07	8.412.564,07
Toplam	31.346.708,40	2.696,26	99.369.065,63	99.369.065,63

2020 ve 2021 yıllarına ait elektrik tüketim tabloları incelendiğinde, tesisin yıllık ortalama yaklaşık 29 milyon kWh elektrik tükettiği belirlenmiştir. Bu tüketimin, 2022 yılı Ağustos ayı birim fiyatları esas alındığında maliyet karşılığı yaklaşık 92 milyon TL olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, yıl boyunca elektrik tüketim miktarının genel olarak kararlı (stabil) bir seyir izlediği görülmüştür.

Tablo 15: 2020 Yılı Buhar Doğalgaz Tüketimi

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	2.431.091,00	209,11	3.476.460,13	3.476.460,13
Şubat	2.303.942,00	201,35	3.347.547,06	3.347.547,06
Mart	2.136.515,00	183,17	3.055.215,46	3.055.215,46
Nisan	643.324,00	55,33	919.953,32	919.953,32
Mayıs	1.826.520,00	157,11	2.611.923,60	2.611.923,60
Haziran	2.333.746,00	200,74	3.337.256,78	3.337.256,78
Temmuz	2.274.513,00	195,64	3.252.553,59	3.252.553,59
Ağustos	2.462.085,00	211,77	3.520.781,55	3.520.781,55
Eylül	2.521.893,00	216,92	3.606.306,99	3.606.306,99
Ekim	2.480.397,00	213,35	3.546.967,71	3.546.967,71
Kasım	2.780.663,00	239,18	3.976.348,09	3.976.348,09
Aralık	2.844.973,00	244,71	4.068.311,39	4.068.311,39
Toplam	27.076.662,00	2.328,97	38.719.626,66	38.719.626,66

Tablo 16: 2021 Yılı Buhar Doğalgaz Tüketimi

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	2.830.628,00	243,47	4.047.798,04	4.047.798,04
Şubat	2.601.617,00	223,78	3.720.312,31	3.720.312,31
Mart	2.948.352,00	253,60	4.216.143,36	4.216.143,36
Nisan	2.650.642,00	227,99	3.790.418,06	3.790.418,06
Mayıs	2.520.595,00	216,81	3.604.450,85	3.604.450,85
Haziran	2.711.732,00	233,25	3.877.776,76	3.877.776,76
Temmuz	2.416.716,00	207,87	3.455.903,88	3.455.903,88
Ağustos	2.039.858,00	175,46	2.916.996,94	2.916.996,94
Eylül	2.743.854,00	236,01	3.923.711,22	3.923.711,22
Ekim	2.914.829,00	250,72	4.168.205,47	4.168.205,47
Kasım	2.912.033,00	250,48	4.164.207,19	4.164.207,19
Aralık	2.911.308,00	250,41	4.163.170,44	4.163.170,44
Toplam	32.202.164,00	2.769,84	46.049.094,52	46.049.094,52

2020 ve 2021 yıllarında buhar için doğalgaz tüketim tabloları incelendiğinde, tesiste yıllık yaklaşık ortalama 28 Milyon kWh buhar için doğalgaz tüketildiği görülmektedir. Bu tüketimin 2022 yılı ağustos ayı birim fiyatları üzerinden karşılığı 40,5 Milyon TL civarındır. Doğalgaz tüketimi mevsimlere göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Tablo 17 ve Tablo 18’de 2020- 2021 yılı sıcak su doğalgaz tüketim tabloları verilmiştir.

Tablo 17: 2020 Yılı Sıcak Su Doğalgaz Tüketim Tablosu

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	3.347.961,00	287,97	4.787.584,23	4.787.584,23
Şubat	2.725.039,00	234,39	3.896.805,77	3.896.805,77
Mart	1.458.390,00	125,44	2.085.497,70	2.085.497,70
Nisan	347.068,00	29,85	496.307,24	496.307,24
Mayıs	423.457,00	36,42	605.543,51	605.543,51
Haziran	0,00	0,00	0,00	0,00
Temmuz	0,00	0,00	0,00	0,00
Ağustos	0,00	0,00	0,00	0,00
Eylül	0,00	0,00	0,00	0,00
Ekim	0,00	0,00	0,00	0,00
Kasım	1.939.092,00	166,79	2.772.901,56	2.772.901,56
Aralık	2.468.387,00	212,32	3.529.793,41	3.529.793,41
Toplam	12.709.394,00	1.093,19	18.174.433,42	18.174.433,42

Tablo 18: 2021 Yılı Sıcak Su Doğalgaz Tüketim Tablosu

Aylar	Tüketim		Maliyet (TL)	
	Satın Alınan		Satın Alınan	Toplam
	kWh	TEP		
Ocak	2.653.356,00	228,23	3.794.299,08	3.794.299,08
Şubat	2.538.418,00	218,34	3.629.937,74	3.629.937,74
Mart	1.731.982,00	148,97	2.476.734,26	2.476.734,26
Nisan	551.434,00	47,43	788.550,62	788.550,62
Mayıs	0,00	0,00	0,00	0,00
Haziran	0,00	0,00	0,00	0,00
Temmuz	0,00	0,00	0,00	0,00
Ağustos	0,00	0,00	0,00	0,00
Eylül	0,00	0,00	0,00	0,00
Ekim	350.023,00	30,11	500.532,89	500.532,89
Kasım	1.216.149,00	104,61	1.739.093,07	1.739.093,07
Aralık	2.267.531,00	195,04	3.242.569,33	3.242.569,33
Toplam	11.308.893,00	972,72	16.171.716,99	16.171.716,99

2020 ve 2021 yıllarında sıcak su için doğalgaz tüketim tabloları incelendiğinde, tesiste yıllık yaklaşık ortalama 12 Milyon kWh sıcak su için doğalgaz tüketildiği görülmektedir. Bu tüketimin 2022 yılı ağustos ayı birim fiyatları üzerinden karşılığı 17,5 Milyon TL civarındır. Sıcak su için yaz aylarında doğalgaz tüketimi olmadığı diğer aylarda dış hava koşullarına göre

değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Tablo 19 ve Tablo 20’de 2020-2021 yılı toplam enerji tüketim tabloları verilmiştir.

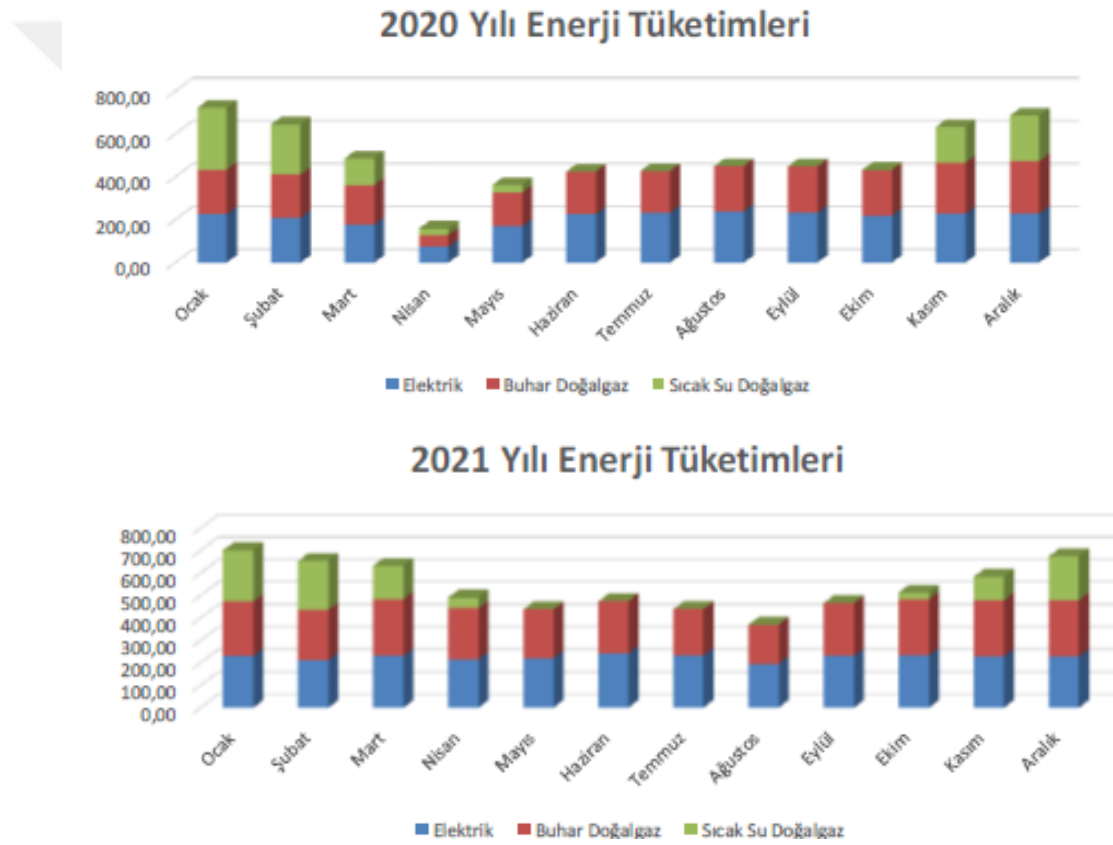
Tablo 19: 2020 Yılı Toplam Enerji Tüketim Tablosu

Aylar	Elektrik		Buhar (TEP)	Doğalgaz	Sıcak Doğalgaz (TEP)	Su (TEP)	Toplam (TEP)	Toplam (TL)	Maliyet
	Satın (TEP)	Alınan							
Ocak	225,27		209,11		287,97		434,38	16.566.188,77	
Şubat	209,45		201,35		234,39		410,80	14.963.543,75	
Mart	177,67		183,77		125,44		361,44	11.688.725,75	
Nisan	73,35		55,33		29,85		128,68	4.119.415,29	
Mayıs	169,57		157,11		36,42		326,68	9.466.992,14	
Haziran	224,96		200,74		0,00		425,69	11.628.017,72	
Temmuz	232,24		195,64		0,00		427,88	11.811.724,77	
Ağustos	238,81		211,77		0,00		450,58	12.321.947,36	
Eylül	232,50		216,92		0,00		449,42	12.175.064,25	
Ekim	219,45		213,35		0,00		432,80	11.634.623,58	
Kasım	227,17		239,18		166,79		466,35	15.121.492,27	
Aralık	227,92		244,71		212,32		472,63	15.997.907,40	
Toplam	2.458,36		2.328,97		1.093,19		4.787,34	147.495.643,05	

Tablo 20: 2021 Yılı Toplam Enerji Tüketim Tablosu

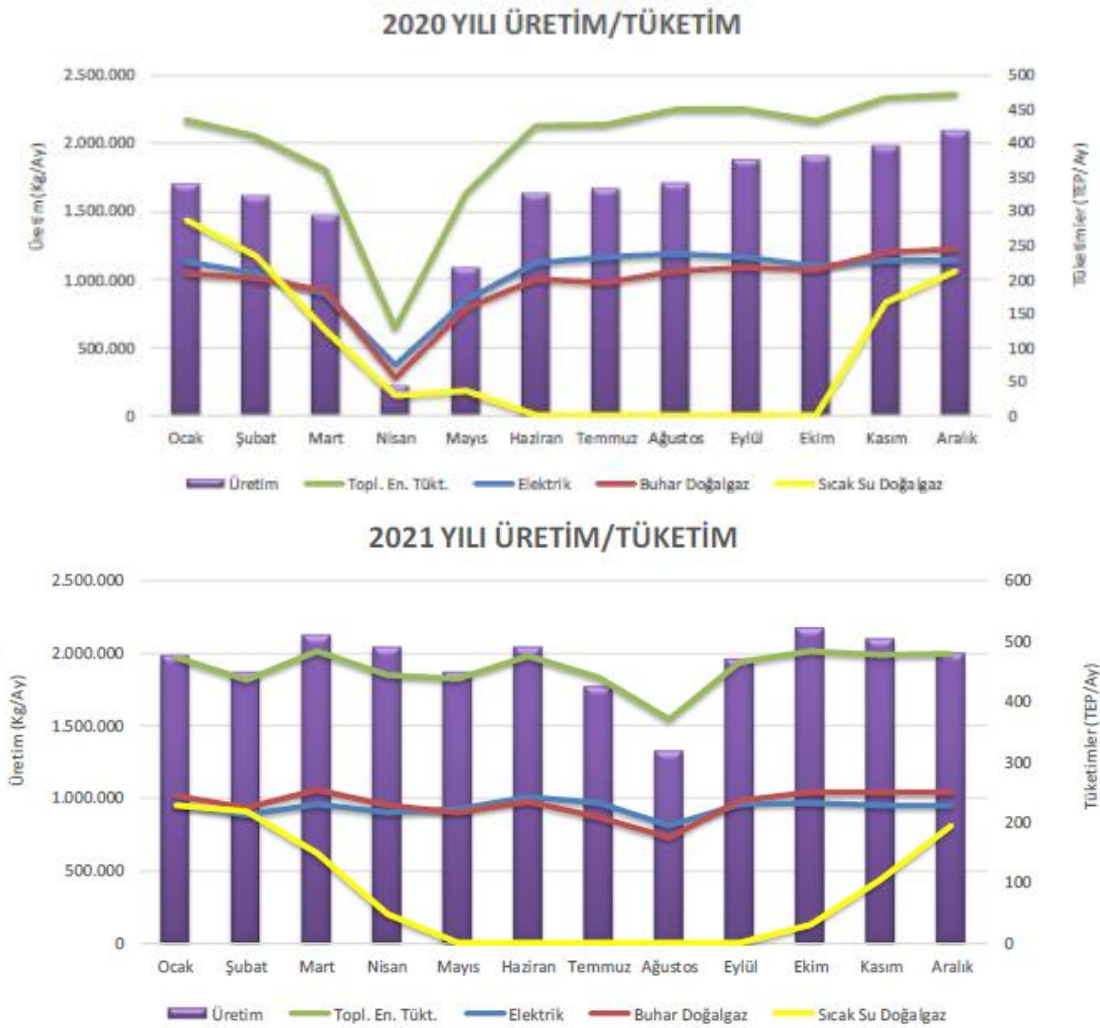
Aylar	Elektrik		Buhar Doğalgaz (TEP)	Sıcak Doğalgaz (TEP)	Su Toplam (TEP)	Toplam (TL)	Maliyet
	Satın (TEP)	Alınan					
Ocak	229,84		243,47	228,23	473,31	16.312.597,06	
Şubat	211,42		223,78	218,34	435,19	15.141.935,70	
Mart	230,16		253,60	148,97	483,76	15.175.360,16	
Nisan	215,47		227,99	47,43	443,46	12.519.837,70	
Mayıs	221,35		216,81	0,00	438,16	11.762.204,93	
Haziran	241,93		233,25	0,00	475,18	12.794.029,42	
Temmuz	231,58		207,87	0,00	439,45	11.990.510,73	
Ağustos	195,49		175,46	0,00	370,94	10.121.535,19	
Eylül	230,10		236,01	0,00	466,11	12.403.797,24	
Ekim	232,80		250,72	30,11	483,51	13.248.279,96	
Kasım	227,87		250,48	104,61	478,35	14.301.485,21	
Aralık	228,26		250,41	195,04	478,68	15.818.303,84	
Toplam	2.696,26		2.769,84	972,72	5.466,10	161.589.877,14	

Toplam enerji tüketim tabloları ayrıntılı olarak incelendiğinde, tesiste elektrik tüketiminin yıl boyunca planlı bakım duruşu yapılan aylar dışında genel olarak stabil bir eğilim sergilediği görülmektedir. Elektrik tüketimindeki bu kararlılık, üretim süreçlerinin ve işletme yükünün yıl boyunca büyük ölçüde benzer düzeylerde seyrettiğini göstermektedir. Buna karşılık doğalgaz tüketiminin, mevsimsel koşulların etkisine bağlı olarak belirgin bir değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle ısıtma ihtiyacının arttığı kış aylarında doğalgaz tüketiminin yükseldiği, yaz aylarında ise iklimlendirme gereksiniminin azalmasına paralel olarak tüketim miktarının düştüğü görülmüştür. Bu durum, doğalgaz kullanımının büyük ölçüde ısıtma amaçlı enerji ihtiyacıyla ilişkili olduğunu, elektrik tüketiminin ise proses ve işletme yüküne bağlı daha sabit bir yapıda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Şekilde elektrik, buhar doğalgaz ve sıcak su doğalgaz enerji tüketim grafikleri verilmiştir.



Şekil 63: 2020-2021 Yılı Aylık Enerji Tüketim Grafiği

Şekilde aylara göre 2020-2021 yılları için üretim/enerji tüketim dağılım grafikleri verilmiştir.



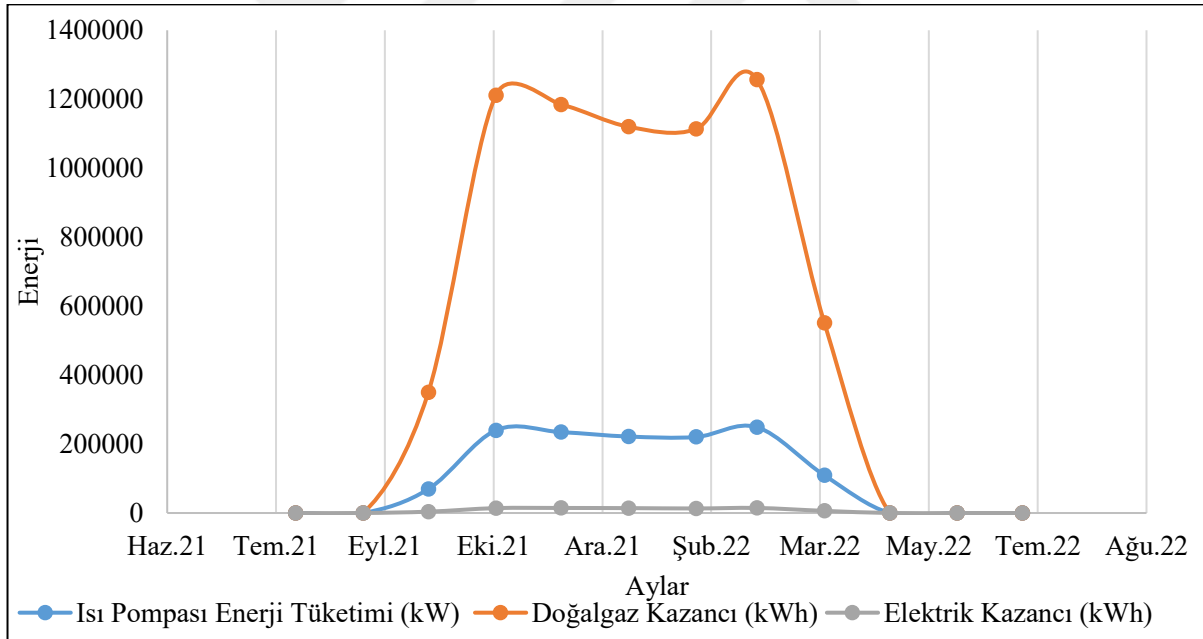
Şekil 64: 2020- 2021 Yılı Aylara Göre Üretim/Enerji Tüketim Dağılım Grafiği

2020 ve 2021 yıllarına ait Üretim–Enerji Tüketim grafiklerinin incelenmesi sonucunda, tesisin enerji tüketim davranışlarının üretim hacmi ve mevsimsel koşullarla yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Her iki yılda da toplam enerji tüketimi eğrisinin üretim miktarlarıyla yüksek düzeyde paralellik göstermesi, tesisin enerji kullanımının üretim odaklı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Üretim miktarının arttığı dönemlerde toplam enerji tüketimi de artmakta; üretim seviyesinin düştüğü aylarda ise toplam tüketimde belirgin düşüşler görülmektedir. Bu durum, enerji tüketiminin büyük ölçüde proses yüküne bağlı olarak şekillendiğini doğrular niteliktedir.

Elektrik tüketimi ile buhar üretimi için kullanılan doğalgaz tüketiminin, toplam enerji tüketimi eğrisiyle uyumlu bir seyir izlediği de grafiklerden açıkça görülmektedir. Her iki yılda da elektrik ve buhar doğalgazı tüketimleri, üretim hacmindeki değişimlere bağlı olarak istikrarlı ve üretimle ilişkili bir artış-azalış yapısı sergilemektedir. Bu tutarlılık, üretim süreçlerinin enerji gereksinimlerinin yıl içerisinde büyük ölçüde benzer şekilde devam ettiğini göstermektedir.

Buna karşılık, sıcak su üretimi için tüketilen doğalgazın mevsimsel etkilerden güçlü biçimde etkilendiği görülmektedir. 2020 ve 2021 grafiklerinde sıcak su doğalgaz tüketimi kış aylarında belirgin şekilde yükselirken yaz aylarında neredeyse sıfıra kadar düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, tesisin sıcak su ihtiyacının dış ortam sıcaklığına ve ısıtma gereksinimine bağlı olarak şekillendiğini, yaz aylarında ısı ihtiyacının olmaması nedeniyle sıcak su sistemlerinin doğalgaz tüketmediğini göstermektedir.

Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, ısı pompası, kazan ve soğutma kulelerinden oluşan hibrit sistemin yıl boyunca enerji performansı analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, Ağustos 2021 - Temmuz 2022 dönemini kapsamaktadır. Her bir ay için soğutma kulesi debileri, giriş-çıkış suyu sıcaklık farkları, ısı pompası ısıtma ve soğutma kapasiteleri, enerji tüketimleri ve kazanç değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar, ısı pompası sisteminin dönemsel yük paylaşımını başarıyla gerçekleştirdiğini, kazanların çalışma sürelerini azalttığını ve soğutma kulelerinin yükünü hafiflettiğini göstermektedir. Elde edilen enerji verilerinden oluşturulan grafiklerde, ısı pompası tüketim değerlerinin kış aylarında yükseldiği, buna paralel olarak doğalgaz kullanımının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.



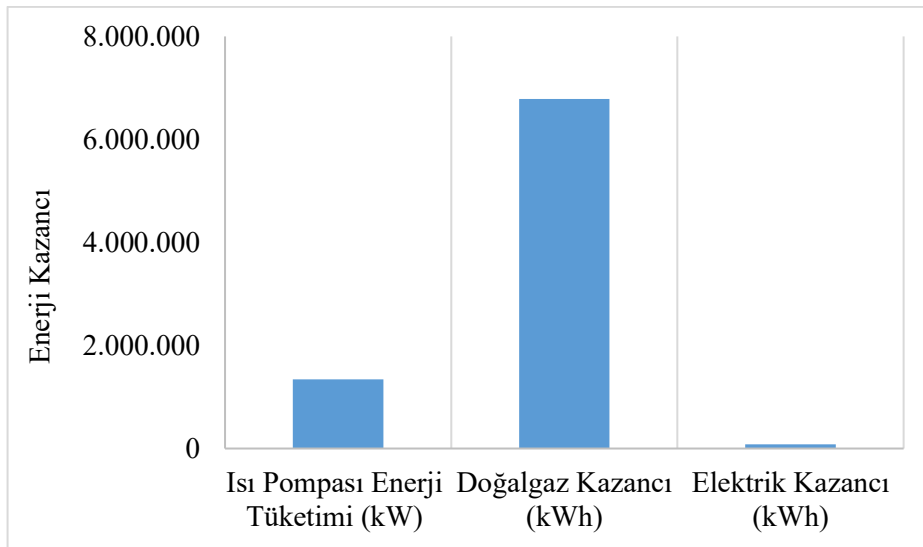
Şekil 65: Aylara Göre Isı Pompası Enerji Tüketimi, Doğalgaz ve Elektrik Kazançları

Grafikte görüldüğü üzere yaz aylarında (Haziran 2021 - Eylül 2021 arası) hem ısı pompası enerji tüketimi hem de doğalgaz kazancı oldukça düşük seviyelerdedir. Bu durum, soğutma veya ısıtma ihtiyacının minimum seviyede olmasıyla açıklanabilir. Özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında neredeyse hiç tüketim ve kazanç oluşmamıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, ısı pompasının devreye girdiği Ekim–Nisan döneminde, sistemin ısıtma kapasitesi 446,94 kW ile 1.605,05 kW arasında değişmiştir. Aynı dönemde, ısı pompasının soğutma kapasitesi ortalama 1.200-1.300 kW aralığında gerçekleşmiştir. Isı pompası uygulamasıyla birlikte yıllık toplam 1.343.508 kWh elektrik tüketimi karşılığında 6.788.251 kWh doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır. Eylül 2021’den itibaren dış hava sıcaklıklarının düşmesiyle birlikte ısıtma ihtiyacı artmış ve buna paralel olarak hem ısı pompası enerji tüketimi hem de doğalgaz kazancı yükselmiştir. Ekim 2021’den Mart 2022’ye kadar olan dönemde doğalgaz kazancının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle Ekim 2021’de başlayan hızlı yükseliş, Ocak–Şubat 2022 aylarında zirveye ulaşmış ve doğalgaz kazancı 1.200.000-1.300.000 kWh aralığına kadar çıkmıştır. Bu durum, ısı pompası kullanımının doğalgaz tüketimine kıyasla önemli bir enerji tasarrufu sağladığını ortaya koymaktadır.

Isı pompası enerji tüketimi ise doğalgaz kazancına paralel olarak artmakta, ancak ölçek bakımından çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır. En yüksek tüketim yaklaşık 250.000 kWh seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu fark, ısı pompasının enerji verimliliğini ve sağladığı tasarrufu göstermektedir. Elektrik kazancı incelendiğinde ise değerlerin tüm dönem boyunca oldukça düşük kaldığı ve diğer parametrelere göre daha sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle kış aylarında küçük bir artış yaşansa da, toplam sistem kazancı üzerinde baskın bir rol oynamadığı anlaşılmaktadır.

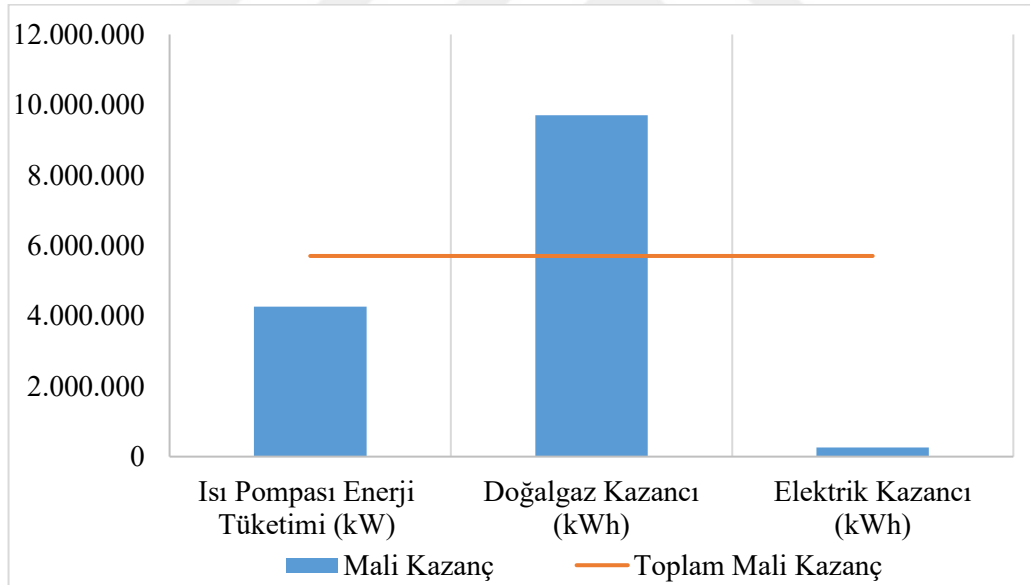
Mart 2022’den itibaren hava sıcaklıklarının artmasıyla birlikte hem ısı pompası tüketimi hem de doğalgaz kazancı hızlı bir şekilde düşmüş, Mayıs 2022 itibarıyla neredeyse sıfıra gerilemiştir. Bu dönemden sonra yaz ayları boyunca tekrar düşük seviyelerde seyrettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 66: Isı Pompası Yıllık Enerji Tüketimi ve Kazanç Dağılımı

Şekilde, ısı pompası sisteminin yıllık enerji tüketimi ile sağlanan doğalgaz ve elektrik kazançları gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, ısı pompası sisteminin yıllık toplam 1.343.508 kWh elektrik tüketimi karşılığında yaklaşık 6.788.251 kWh doğalgaz tasarrufu sağladığı görülmektedir. Elektrik kazancı ise 80.626 kWh olarak belirlenmiştir. Grafikte açıkça görüldüğü üzere, en yüksek enerji kazancı doğalgaz kazancı ile elde edilmiştir. Değer yaklaşık 7.000.000 kWh seviyelerine ulaşarak diğer parametrelerden çok daha yüksek bir katkı sağlamıştır. Bu durum, ısı pompası kullanımının doğalgaz tüketimini ciddi ölçüde azalttığını ve enerji verimliliği açısından en büyük faydayı doğalgaz tasarrufuyla sağladığını ortaya koymaktadır. Isı pompası enerji tüketimi ise doğalgaz kazancına kıyasla oldukça düşük seviyede kalmıştır. Yaklaşık 1.500.000 kWh seviyelerinde gerçekleşen bu tüketim, doğalgaz tasarrufu ile kıyaslandığında oldukça avantajlıdır. Yani sisteme giren elektrik enerjisi, doğalgaz kullanımından elde edilen kazançla kıyaslandığında çok daha yüksek bir geri dönüş sağlamaktadır.

Elektrik kazancı ise grafikte görüldüğü gibi oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Diğer iki parametreye kıyasla etkisi sınırlı olsa da, toplam sistem performansına katkı sağlayan ikincil bir unsur olarak değerlendirilebilir.



Şekil 67: Isı Pompası Sistemine Ait Yıllık Mali Kazanç Dağılımı

Grafığe göre: ısı pompası sisteminin yıllık enerji tüketimi ve buna bağlı olarak elde edilen mali kazançlar gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, ısı pompası sisteminin yıllık toplam ₺5.703.864 elektrik giderine karşılık, ₺9.707.199 doğalgaz tasarrufu ve ₺255.585 elektrik kazancı sağladığı görülmektedir. Toplamda sistemin ₺9.962.784 yıllık mali kazanç elde ettiği hesaplanmıştır.

Isı pompası enerji tüketimi, doğalgaz kazancına kıyasla daha düşük olmakla birlikte, yine de önemli bir mali katkı sağlamaktadır. Yaklaşık 4.200.000 birim civarında gerçekleşen bu kazanç, sistemin elektrik ile çalışmasına rağmen ekonomik açıdan avantajlı olduğunu göstermektedir.

Elektrik kazancı ise çok düşük düzeyde kalmıştır. Yaklaşık 200.000 birim seviyelerinde görülen bu değer, sistemin toplam mali kazancına sınırlı bir katkı yapmaktadır.

Turuncu çizgiyle gösterilen toplam mali kazanç, tüm kalemlerin birleşiminden elde edilen toplam getiriyi ifade etmektedir. Bu değer, özellikle doğalgaz kazancının yüksekliği sayesinde yaklaşık 5.800.000 birim seviyesinde gerçekleşmiştir. Elde edilen tüm bu kazançlar CO₂ salınımı açısından incelendiğinde elde edilen CO₂ salınımının hesaplaması verilmiştir.

Tablo 21: CO₂ Salınım Hesabı

Doğalgaz	$6.788.251 * 0,234 = 1.588.450,73 \text{ kg CO}_2\text{-e}$
Isı pompası toplam enerji tüketimi	$1.343.508 * 0,555 = 745.646,94 \text{ kg CO}_2\text{-e}$
Elektrik kazancı	$80.626 * 0,555 = 44.747,43 \text{ kg CO}_2\text{-e}$

Tabloda bulunan 0,234 kg CO₂-e/kWh değeri, doğalgazın emisyon faktörüdür, yani her 1 kWh doğalgaz yakıldığında 0,234 kg CO₂ salınır, elektrik şebekesinden alınan her 1 kWh enerji, ortalama 0,555 kg CO₂ eşdeğeri emisyon oluşturur. Bu değer, ortalama bir ağacın yılda yaklaşık 14 kg CO₂ absorbe ettiği kabulüyle değerlendirildiğinde, yaklaşık 58.000 ağacın yıllık karbon tutumuna eşdeğer bir çevresel faydaya karşılık gelmektedir. Bu sonuç, sistemin yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılması ve sürdürülebilir çevresel etkiler bakımından da son derece olumlu bir uygulama olduğunu göstermektedir.

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Tez kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Isı pompası sisteminin enerji tüketimi, doğalgaz ve elektrik kazançları ile mali kazanımları ayrıntılı biçimde yorumlanmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada ısı pompası sisteminin enerji tüketimi, doğalgaz kazancı, elektrik kazancı ve mali kazançları detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular hem enerji verimliliği hem de ekonomik boyut açısından değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

Aylık enerji tüketim ve kazanç değerlerinin incelendiği grafikler göstermektedir ki, ısı pompası enerji tüketimi özellikle kış aylarında artış göstermekte, ancak yaz aylarında neredeyse sıfır seviyelerine düşmektedir. Bu durum, ısı pompasının kullanımının mevsimsel ısıtma ihtiyacına bağlı olduğunu kanıtlamaktadır. Kış aylarında en yüksek tüketim değerleri yaklaşık 250.000 kWh seviyelerinde gerçekleşirken, buna karşılık doğalgaz kazancının 1.200.000 - 1.300.000 kWh seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuç, ısı pompasının harcadığı elektriğe karşılık çok daha yüksek oranda doğalgaz tasarrufu sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Elektrik kazancı ise tüm dönem boyunca oldukça düşük seviyelerde kalmış, sistemin toplam verimliliğine sınırlı bir katkı sağlamıştır.

Toplam enerji kazançlarının karşılaştırıldığı grafik, doğalgaz kazancının toplam enerji faydasında en büyük paya sahip olduğunu göstermektedir. Yaklaşık 7.000.000 kWh düzeyinde gerçekleşen doğalgaz kazancı, ısı pompası enerji tüketiminin yaklaşık 1.500.000 kWh değerine kıyasla çok daha yüksek bir tasarruf sağlamıştır. Elektrik kazancının ise yaklaşık 200.000 kWh düzeyinde kaldığı ve diğer parametreler karşısında oldukça düşük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, sistemin enerji boyutunda en önemli katkının doğalgaz kullanımının azaltılması yoluyla elde edildiğini göstermektedir.

Mali boyutta yapılan değerlendirme sonucunda doğalgaz kazancının ekonomik açıdan en yüksek faydayı sağladığı ortaya çıkmıştır. Doğalgaz mali kazancı yaklaşık 9.500.000 birim seviyelerine ulaşarak sistemin toplam mali faydasında en baskın unsur olmuştur. Isı pompası enerji tüketimi de mali açıdan olumlu katkı sunmuş ve yaklaşık 4.200.000 birim düzeyinde mali kazanç sağlamıştır. Elektrik kazancı ise düşük seviyelerde kalarak yaklaşık 200.000 birimlik katkı sunmuştur. Toplam mali kazanç, tüm kalemlerin birleşimiyle yaklaşık 5.800.000 birim olarak hesaplanmış ve ısı pompası kullanımının ekonomik açıdan da oldukça avantajlı olduğu

ortaya konmuştur.

Ekonomik analiz sonuçlarına göre, ısı pompası uygulaması yıllık yaklaşık 5,7 milyon TL enerji maliyeti tasarrufu sağlamış ve sistemin geri ödeme süresi 2,41 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durum, yapılan yatırımın kısa sürede kendini amorti ettiğini ve uzun vadede işletme giderlerini azaltacağını ortaya koymaktadır. Ayrıca, hibrit sistem (kazan + ısı pompası + soğutma kulesi) sayesinde enerji tüketiminde esneklik, yük dengeleme ve sistem kararlılığı sağlanmıştır. Sistem, kış aylarında ısı pompası destekli ısıtma, yaz aylarında ise soğutma kulesi destekli soğutma fonksiyonlarını etkin biçimde yerine getirmiştir.

Sonuç olarak, yapılan analizler göstermektedir ki ısı pompası sistemleri özellikle kış aylarında doğalgaz tüketiminin azaltılmasında kritik bir rol üstlenmekte ve yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Harcanan elektrik enerjisine karşılık elde edilen doğalgaz tasarrufu hem enerji hem de mali açıdan oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Elektrik kazancı düşük düzeyde kalmış olsa da, doğalgaz kazancının baskınlığı sistemin toplam performansını güçlü kılmaktadır. Bu bulgular, ısı pompası kullanımının sürdürülebilir enerji politikaları açısından önemli bir alternatif olduğunu, enerji arz güvenliğine ve ekonomik tasarrufa katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma, enerji yönetim sistemlerinin sanayi tesislerinde uygulanabilirliğini göstermesi açısından önemlidir. Endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen bu uygulama, fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması açısından örnek teşkil etmektedir. Enerji etüt raporlarıyla desteklenen bu çalışma, Türkiye'nin enerji verimliliği stratejilerine ve 2030 karbon azaltım hedeflerine doğrudan katkı sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; su kaynaklı ısı pompaları, endüstriyel tesislerde sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada etkin bir araçtır. Bu sistemler, doğalgaz bağımlılığını azaltmakta, karbon ayak izini küçültmekte ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Özellikle yıl boyu ısıtma ve soğutma ihtiyacının bir arada bulunduğu lastik, gıda, kimya ve tekstil gibi sektörlerde büyük bir enerji tasarrufu potansiyeline sahiptir.

Elde edilen tasarruflar ile yaklaşık doğalgazdan 1.588.450,73 kg CO₂-e, Isı pompası toplam enerji tüketimi 44.747,43 kg CO₂-e ve Elektrik kazancı 745.646,94 kg CO₂-e emisyonu oluştuğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, ısı pompası sistemlerinin sanayi tesislerinde yüksek enerji verimliliği, düşük emisyon ve ekonomik kazanç sağladığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, hibrit yapıdaki bu sistemin Türkiye'nin enerji verimliliği ve karbon azaltım hedefleri açısından sürdürülebilir bir çözüm sunduğu belirlenmiştir.

Tartışma

Çalışmadan elde edilen bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Özellikle kış aylarında ısı pompası kullanımının doğalgaz tüketimine alternatif oluşturduğu ve yüksek tasarruf sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, elektrik kazancının sınırlı olması sistemin temel avantajının doğalgaz tasarrufu üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir.

Bunun yanı sıra, ısı pompası enerji tüketimi ile doğalgaz kazancı arasındaki fark sistem verimliliğini ortaya koymaktadır. Harcanan elektrik enerjisine karşılık elde edilen doğalgaz tasarrufu oldukça yüksek olup, bu durum sistemin ekonomik geri dönüş süresini kısaltmaktadır. Ancak elektrik fiyatlarındaki değişkenlik, toplam maliyet hesabını doğrudan etkileyebileceğinden, sistem performansının farklı senaryolar altında da incelenmesi önem arz etmektedir.

Öneriler

Bu çalışma, su kaynaklı ısı pompası sistemlerinin Türkiye sanayi sektöründeki enerji dönüşüm potansiyelini göstermesi bakımından örnek teşkil etmektedir. Elde edilen sonuçlar, enerji verimliliği stratejileri geliştirmek isteyen mühendislik uygulamaları için yol gösterici niteliktedir. Isı pompası sistemlerinin verimliliğini artırmak için, dış hava sıcaklığına bağlı otomasyon sistemleri ile çalıştırılması önerilmektedir.

Elektrik maliyetlerinin sistemin toplam kazancına etkisi göz önüne alındığında, ısı pompasının yenilenebilir enerji kaynakları (örneğin güneş panelleri) ile desteklenmesi ekonomik avantajı daha da artırabilir.

Daha geniş örneklemli saha çalışmaları yapılarak farklı iklim bölgelerinde sistem performansı karşılaştırılmalı, böylece ısı pompası kullanımının ulusal ölçekte yaygınlaştırılmasına yönelik politikalar desteklenmelidir.

Isı pompası yatırımlarının teşvik edilmesi, uzun vadede doğalgaz bağımlılığını azaltarak enerji arz güvenliğine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Acunha, I. (2025). *Energy efficiency in industrial refrigeration systems*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008174>
- Afshari, F., & Dehghanpour, H. (2019). A review study on cooling towers; types, performance and application. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1-10.
- Ağ, C., & Kızılkın, Ö. (2023). PVT Entegreli CO₂ İle Çalışan Hibrit Bir Isı Pompası Sisteminin Performans Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 297-304. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1232005>
- Akmeşe, B. (2023). *Gaz yakıtlı bir kazanda farklı tipteki türbülâtörlerin termal performansa etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 809201)
- Alaiwi, Y., & Al-Omari, S. B. (2024). Types of cooling towers: A review. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 106-114.
- Anta, D., Andrés, L., Ángeles, M., Sánchez, D., & Llopis, R. (2024). Exploración de la mezcla RE170/R600: Mejora de la eficiencia como alternativa al R600a. *Cytec2024*. <https://doi.org/10.21134/sg9wr66>
- Apriliyani, D., Dharen, H., Junjuna, B., & Muldea, M. (2023). Analisis bahan material komponen dan pemanfaatan hukum termodinamika dalam desain kulkas yang ramah lingkungan. *Arjuna*, 2(1), 184–201. <https://doi.org/10.61132/arjuna.v2i1.487>
- Araz, M., Güngör, E., & Hepbaşlı, A. (2013). Düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanların soğutma uygulamalarındaki kullanımının değerlendirilmesi. *Soğutma Teknolojileri Sempozyumu*, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- ASHRAE. (2021). *ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- Ataman, H. (1991). *Toprak kaynaklı bir ısı pompası tesisinin tasarımı ve optimizasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.14368)
- Basok, B., Dubovskyi, S., Pastushenko, E., Nikitin, Y., & Bazeev, Y. (2023). Heat pumps as a trend of low-carbon energy development. *Energy Technologies & Resource Saving*, 75(2), 23-44. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02>
- Baş, F. (2024). *Endüstriyel işletmelerde bulunan soğutma kulelerinde dış hava sıcaklığının ve atmosfer şartlarının enerji verimliliğine etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 892911)
- Başhan, V., & Demirel, H. (2019). Application of fuzzy DEMATEL technique to assess most common critical operational faults of marine boilers. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 545-555. <https://doi.org/10.2339/politeknik.480799>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Moschos, K., & Antonopoulos, K. A. (2016). Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems. *Energy Conversion and Management*, 120, 306-319.
- Bernat, T., & Bieńczyk, K. (2024). Methodology of multiple-criteria decision making for selecting a refrigerant to be used in commercial refrigeration equipment. *Energies*, 17(20), 5150. <https://doi.org/10.3390/en17205150>

- Cai, J., Zhang, F., & Ji, J. (2020). Comparative analysis of solar-air dual source heat pump system with different heat source configurations. *Renewable Energy*, 150, 191-203.
- Couvillion, R. (1985). Field and laboratory simulation of earth-coupled heat pump. *ASHRAE Transactions*, 91(2), 1326-1334.
- Çokgez Kuş, A., & Çomaklı, K. (2015). Farklı kaynaklı ısı pompası sistemlerinin ekonomik analizi. *Tesisat Mühendisliği*, 148, 13-21.
- Çomaklı, K., & Terhan, M. (2011). Sıcak su üretimi için baca gazı atık enerjinin kullanımı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 124, 43-51.
- Doak, A., Stanier, C., Anthony, J., & Udaykumar, H. (2022). Can heat-pumps provide routes to decarbonization of building thermal control in the US Midwest? *Energy Science & Engineering*, 10(8), 2612-2621. <https://doi.org/10.1002/ese3.1159>
- Doğan, B., Yalçınkaya, C., & Balcı, M. G. (2016). Kırıkkale ilinde bulunan olimpiik yüzme havuzunda su ısıtma için toprak kaynaklı ısı pompası kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 57(681), 38–48. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/013_makale_kirikkale.pdf
- Doğan, E. (2020). *Kanalizasyon atık su kaynaklı ısı pompası sisteminin teorik analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 654120)
- Doğan, V. (2003). Su-toprak kaynaklı ısı pompaları. *Tesisat Mühendisliği*, Eylül-Ekim 2003. (ECBS Enerji Verimliliği Portalı). (t.y.). *Enerji verimliliği portalı*. <https://ecbs.enerji.gov.tr/portal/apps/webappviewer/index.html?id=0a74793f9918465780f2b3431c07fef7>
- Erdem, S. (2007). *Villa ısıtmasında ve soğutmasında güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı ısı pompasının ekonomikliğinin analizi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 200874)
- Erdoğan, S., Yılmaz, M., Şahin, B., & Özyurt, Ö. (2006). Isı pompası sistemlerinin seçimi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 92, 40–49.
- Eskilson, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction borehole*. İsveç: Technical Report.
- Evirgen, Y. F. (2009). *Karayollarında buzlanmayı engelleyici toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin analizi ve PLC-SCADA ile denetimi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 268194)
- Evlice, F. (2024). *Endüstriyel bir bina için atık su kaynaklı ısı pompası ile sıcak su eldesinin teknik ve ekonomik analizi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 860985)
- Fan, X., Zhang, X., Wei, X., Wang, F., & Zhang, X. (2013). Performance assessment of blends of CO₂ with eco-friendly working fluids for heat pump applications. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* <https://doi.org/10.1115/imece2013-63354>
- Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- Glavan, I., Poljak, I., Mustać, M., & Lonić, I. (2022). Natural refrigerant on board marine vessels. *Journal of Maritime & Transportation Science*, 62(1), 43–56.

- Goričanec, D., Ivanovski, I., Krobe, J., & Urbanc, D. (2020). The exploitation of low-temperature hot water boiler sources with high-temperature heat pump integration. *Energies*, 13(23), 6311.
- Gou, X., Fu, Y., Shah, I., Ya-mei, L., Xu, G., Yang, Y., ... & Wu, J. (2016). Research on a household dual heat source heat pump water heater with preheater based on Aspen Plus. *Energies*, 9(12), 1026. <https://doi.org/10.3390/en9121026>
- Guo, L., & Shan, W. (2022). Water source heat pump's stuck problems and solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2174(1), 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2174/1/012084>
- Guo, S. (2024). Feasibility and economic viability of heat pumps in energy-efficient applications. *Highlights in Science Engineering and Technology*, 83, 360-365. <https://doi.org/10.54097/91k26260>
- Hacı, M., Kahraman, Z., Taşkıran, B., & Soyhan, H. (2023). Ecofriendly design of a commercial refrigerator for energy efficiency label. *Materials, Methods & Technologies*, 17(1), 82-92. <https://doi.org/10.62991/mmt1996355790>
- Hadi, S., Wijaya, Y., Elysabeth, I., Aisyah, N., Putra, R., & Ariyadi, H. (2023). Energy performance analysis of R32 and R134a refrigerant for spring pool water heater. *Advanced Engineering Letters*, 2(3), 88-95.
- Han, C., Kim, J., Lee, S., & Kim, Y. (2024, April 11–13). Economic and performance analysis of hybrid water source heat pumps at low water temperatures. In Proceedings of the 9th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'23) (Paper No. ENFHT 309). London, United Kingdom. <https://doi.org/10.11159/enfht24.309>
- Han, C., Lee, S., Kim, J., & Kim, Y. (2024). Economic and performance analysis of hybrid water source heat pumps at low water temperatures. ENFHT 2024 Conference Proceedings. <https://doi.org/10.11159/enfht24.309>
- Han, Z., Wang, K., Dai, L., Li, K., & Wang, X. (2024). Recent application of heat pump systems for environmental control in livestock facilities-A review. *Agriculture*, 14(12), 2309. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122309>
- Hepbaşlı, A., & Kalıncı, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1211-1229.
- Ilyin, R., Shishkin, N., Konkov, I., & Volkova, A. (2020). Circuit decisions for heating vegetable oil tanks using thermal pump at Marine Trade Port Olya, JSC in Astrakhan Region. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2020(2), 120-126. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-2-120-126>
- (İSKİD). (t.y.). *İSKİD – İklimlendirme Soğutma Klima İmalatçıları Derneği*. <https://iskid.org.tr>
- Karabulut, N. (2024). *Güneş enerjisi destekli ısı pompasının bir villa projesine uygulanması ve termoekonomik analizi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 884822)
- Karthik, M., Samuel, K., Bhargav, K., Varma, K., Subramanian, A., Kanna, N., ... & Gundabattini, E. (2023). Investigation on the environmental impact of R32, R152a and R41 refrigerant blends. *Engineering Research Express*, 5(2), 025077. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acdf3e>

- Kivevele, T. (2022). Propane (HC-290) as an alternative refrigerant in the food transport refrigeration sector in Southern Africa – A review. *Automotive Experiences*, 5(1), 75-89. <https://doi.org/10.31603/ae.5994>
- Kural, A. K. (2012). *Malatya ilinde bir binada toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasının merkezi klima ve doğalgazlı sistemlerle karşılaştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 318780)
- Kurevija, T. (2016). Energy and environmental advantages of gas heat pumps comparing to conventional heating and cooling systems. *International Congress on Energy and Environments*.
- Lemouari, M., Boumaza, M., & Mujtaba, I. M. (2008). Thermal performance investigation of a hybrid cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 28, 125-135.
- Lepiksaar, K., Kalme, K., Siirde, A., & Volkova, A. (2021). Heat pump use in rural district heating networks in Estonia. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 786-802. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0059>
- Li, J., Sun, X., Zhu, J., Karkon, E. G., & Novakovic, V. (2024). Performance comparison of air source heat pump coupling with solar evacuated tube water heater and that with micro heat pipe PV/T. *Energy*, 300, 131600.
- Li, Y., Nord, N., Rekstad, I., Skånøy, S., & Sørensen, L. (2021). Study of a water-source CO₂ heat pump for residential use: Experimental discharge pressure control and performance analysis. *E3S Web of Conferences*, 246, 06010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124606010>
- Liu, Z., Tan, H., & Li, Z. (2017, October 19–22). *Heating and cooling performances of river-water source heat pump system for energy station in Shanghai*. In 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC2017), Jinan, China.
- Lv, R., Li, Z., Wang, Y., & Li, M. (2022). Heating performance of heat pump air conditioning system for battery electric vehicle with different refrigerants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 238(4), 702–718. <https://doi.org/10.1177/09544070221135445>
- Mahdi, Q. S., & Al-Hachami, M. R. (2015). Experimental analyses for NDWCT performance using trickle fill under the effect of cross wind. *International Journal of Science Research and Education*, 3(3), 2969–2977.
- Mechmet, A. (2023). *Yapılarda ısı pompasının kullanımının enerji etkinliği bakımından incelenmesi – Edirne örneği*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 822084)
- Mei, S., Liu, Z., & Liu, X. (2023). Research progress and applications of transcritical carbon dioxide heat pumps: A review. *Clean Energy Science and Technology* 1(2). <https://doi.org/10.18686/cest.v1i2.118>
- Menegazzo, D., Lombardo, G., Vallese, L., & Bobbo, S. (2025). Experimental compressed liquid density measurements and correlation of the binary mixture {n-pentane (R601) + trans-1-chloro-3,3,3-trifluoro-1-propene (R1233zd(E))}. *International Journal of Thermophysics*, 46(3). <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03509-5>
- Mohammed, G., Saleh, A., & Khalifa, A. (2024). A comprehensive review of the hybrid heating systems consisting of heat pumps and solar collectors for hot water and space heating application. *Engineering and Technology Journal*, 42(07), 1031-1047.

- Murano, G., Caffari, F., & Calabrese, N. (2024). Energy potential of existing reversible air-to-air heat pumps for residential heating. *Sustainability*, 16(14), 6047. <https://doi.org/10.3390/su16146047>
- Mutlu, Y. T. (2025). *Gemi buhar kazanı suyunun ısılahının otomasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 943225)
- Naik, B. K., Choudhary, V., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017). Performance assessment of a counter flow cooling tower-unique approach. *Energy Procedia*, 109, 243-252.
- Neumaier, L., Roskosch, D., Schilling, J., Bauer, G., Groß, J., & Bardow, A. (2023). Refrigerant selection for heat pumps: The compressor makes the difference. *Energy Technology*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/ente.202201403>
- Öztürk, M. (2015). *Toprak kaynaklı ısı pompalarında toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 405877)
- Pensini, A., Rasmussen, C. N., & Kempton, W. (2014). Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels. *Applied Energy*, 131, 530-543. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.111>
- Qin, Z., Tong, M., & Kun, L. (2012). Experimental investigation on water quality standard of Yangtze River water source heat pump. *Water Science & Technology*, 66(5), 1103-1109. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.294>
- Pastore, L., Groppi, D., & Feijoo, F. (2024). District heating deployment and energy-saving measures to decarbonise the building stock in 100% renewable energy systems. *Buildings*, 14(8), 2267. <https://doi.org/10.3390/buildings14082267>
- Rafferty, K. D. (1992). Large tonnage groundwater heat pumps-experiences with two systems. *ASHRAE Transactions*, 98(1), 587-592.
- Rusowicz, A., Dybiński, O., Szcześniak, A., Grzebielec, A., Milewski, J., & Romaszkiwicz-Kotkowska, R. (2022). Systems of heat pumps in water loop. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, 4, 63-68. <https://doi.org/10.37105/iboa.159>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441-454.
- Schibuola, L., & Scarpa, M. (2016). Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump. *Energy and Buildings*, 113(1), 182-188.
- Sciacovelli, A., Guelpa, E., & Verda, V. (2014). Multi-scale modeling of the environmental impact and energy performance of open-loop groundwater heat pumps in urban areas. *Applied Thermal Engineering*, 71, 780-789.
- Seçikmiş, A. (2006). *Su kaynaklı ısı pompalarında ekserji analizi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 185276)
- Shamim, J., Auti, G., Kimura, H., Fei, S., Hsu, W., Daigji, H., & Majumdar, A. (2022). Concept of a hybrid compression-adsorption heat pump cycle. *Cell Reports Physical Science*, 3(5), 100879. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100879>
- Si, P., Rong, X., Li, A., Min, X., Yang, Z., & Xie, W. (2015). The design of water intake system and analysis of water quality conditions of the regional energy system of complex river water source heat pump. *Open Energy & Fuels Journal*, 8.

- Sungur, S. (2022). *Bir alışveriş merkezi binasında kullanılan iklimlendirme sistemleri için potansiyel enerji etkin kullanım ve enerji geri kazanım yöntemlerinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 730784)
- Sutton, I. (2017). *Plant design and operations*. Gulf Professional Publishing.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2021). Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, AB ve Dış İlişkiler Genel Müdürlüğü, Ankara.
- TSB ENERGY. (t.y.). *Sıcak su kazanı* [Web sayfası]. TSB ENERGY. Erişim: 25 Ekim 2025, <https://www.tsbenergy.com/tr/>
- Ünlü, K. (2005). *Hava ve toprak kaynaklı ısı pompalarına etki eden parametrelerin incelenmesi*. (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 198640)
- Valančius, R., Singh, R., Jurelionis, A., & Vaičiūnas, J. (2019). A review of heat pump systems and applications in cold climates: *Evidence from Lithuania*. *Energies*, 12(22), 4331. <https://doi.org/10.3390/en12224331>
- Valizade, L. (2013). Ground source heat pumps. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(3).
- Van Vliet, M. T., Wiberg, D., Leduc, S., & Riahi, K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6(4), 375-380.
- Vidinlioğlu, H. C., & Cimşit, C. (2023). R410A akışkanı için su kaynaklı ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi. *European Journal of Science and Technology (EJOSAT)*, 44, 317-325. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1245248>
- Vo, K. and Nguyen, T. (2024). Evaluation of energy saving efficiency of boiler combined with heat pump for supplementary feed water heating. *Journal of Technical Education Science*, 19(06), 56-65. <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1705>
- Wang, C., Cheng, L., Hao, Y., Jiang, M., Chen, K., & Shao, K. (2022). Efficiency improvement and application of the groundwater heat pump cooling system in Linglong gold mine. *Geofluids*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/3191735>
- Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Xu, P., & Sun, C. (2015). Experimental study of a novel PV/T-air composite heat pump hot water system. *Energy Procedia*, 70, 537-543. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.158>
- Wang, M., & Yu, Y. (2013). Analysis of water heat pollution of thermal discharge in surface water source heat pump system. *Applied Mechanics and Materials*, 368, 364-368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.368-370.364>
- Wei, W., Wang, M., & Pan, J. (2012). Numerical simulation analysis of the groundwater temperature field in the concentration area of the water source heat pump engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 174, 3027-3030. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.174-177.3027>
- Wu, J., Ma, Y., Peng, G., Pan, X., & Xie, J. (2024). A comparative study on the thermal performance of R290 and R32 rotary compressors in the air conditioner. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 239(6), 2177-2184. <https://doi.org/10.1177/09544062241293379>
- Xu, Y., Guo, Z., & Yuan, C. (2022). Feasibility study of an integrated air source heat pump water heater/chillers and exhaust gas boiler heating system for swimming pool on luxury

- cruise ship. *Energy Reports*, 8, 1260-1282.
- Yang, D., Li, Y., Xie, J., & Wang, J. (2021). Research and application progress of transcritical CO₂ refrigeration cycle system: A review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 245-256. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab086>
- Yang, Y., Wu, R., & Yue, Y. (2022). Ice melting performance of solar-assisted cold water phase-change energy heat pump system. *Energies*, 15(16), 5905. <https://doi.org/10.3390/en15165905>
- Yurtcu, A. E. R. (2020). *Sıcak su kazanlarında kullanılan transmisyon millerinin iyileştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 636540)
- Zhang, H., & Xu, E. (2013). Experimental investigation of a heat storage solar water heater-water/air source heat pump double stage coupling capillary network heating system. *Applied Mechanics and Materials*, 316, 80-83. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.316-317.80>
- Zhang, J., Zeng, H., Djapa, D., & Rugwizangoga, B. (2025). Physical property calculation and refrigeration cycle analysis of mixed refrigerant R32/R290. *Buildings*, 15(7), 1071.
- Zhang, L., Zhou, M., Yang, C., Li, Y., Fu, Z., Juan-fang, W., ... & Jin, L. (2019). Evaluation and optimization of water source heat pump for district heating: A case study in steel plant. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9399-9413. <https://doi.org/10.1002/er.4955>
- Zhang, W., Lü, J., Ruolin, H., Li, W., & Feng, H. (2017). Investigation of operation optimization of CCHP and water source heat pump compound energy supply systems. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10(2), 96-102. <https://doi.org/10.25103/jestr.102.11>
- Zhang, X., Wang, F., Fan, X., & Xue, Y. (2015). Binary blend of carbon dioxide and fluoroethane as working fluid in transcritical heat pump systems. *Thermal Science*, 19(4), 1317-1321. <https://doi.org/10.2298/tsci1504317z>
- Zhang, Y., Akkurt, N., Yuan, J., Xiao, Z., Wang, Q., & Gang, W. (2020). Study on model uncertainty of water source heat pump and impact on decision making. *Energy and Buildings*, 216(1).
- Zhang, Y., Ma, Q., Li, B., Fan, X., & Fu, Z. (2017). Application of an air source heat pump (ASHP) for heating in Harbin, the coldest provincial capital of China. *Energy and Buildings*, 138, 96-103.
- Zhao, Z., Zhang, Y., Mi, H., Zhou, Y., & Zhang, Y. (2018). Experimental research of a water-source heat pump water heater system. *Energies*, 11(5), 1205. <https://doi.org/10.3390/en11051205>
- Zlateva, P., & Yordanov, K. (2019). Experimental study of heat pump type air-water for heating system performance. *E3S Web of Conferences*, 112(02008), 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911202008>

ÖZ GEÇMİŞ

Halil İbrahim KAZİCİ, lisans eğitimini Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden tamamlayarak mezun olmuştur. Lisans eğitiminin ardından Bandırma Üniversitesi Akıllı Ulaşım Sistemleri Bölümünde yüksek lisans eğitimi görmüş ardından Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde, Doç. Dr. Alperen TOZLU danışmanlığında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Akademik çalışmalarının yanı sıra, ECA bünyesinde Eğitim Uzman Yardımcısı olarak görev yapmaktadır.

