



**DOĞAL SOĞUTUCU AKIŞKANLI BİR ISI POMPASI SİSTEMİNİN
TASARIMI VE ANALİZİ**

Mustafa GÜLMEZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa GÜLMEZ

11/07/2023

DOĞAL SOĞUTUCU AKIŞKANLI BİR ISI POMPASI SİSTEMİNİN
TASARIMI VE ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa GÜLMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2023

ÖZET

Enerji günümüzün belki de geleceğin en önemli konuları arasında yer alacaktır. Enerjinin verimli kullanılması, yüksek verimliliğe sahip tasarımların geliştirilmesi biz mühendislerin en büyük sorumlulukları arasında yer almaktadır. Isı pompası sistemlerinin verimli hale getirilmesi de bu sorumluluğun bir parçasıdır. Bu sistemlerde kullanılan soğutucu akışkanların düşük küresel ısınma potansiyeline (KIP) ve ozon delme potansiyeline (ODP) sahip olması büyük önem arz etmektedir. Bunlar çevre kirliliğinin önlenmesinde büyük katkı sağlayacak sistem parametreleridir. Ayrıca ısı pompalarının en büyük sorunlarından bir tanesi soğuk ortamlarda çalışan sistemlerin buzlanma sorunu ile karşı karşıya kalmaları ve böylelikle çok düşük verimlerde çalışıyor olmalarıdır. Yukarıda bahsedilen konuların çözümü için bu tez çalışmasında enerji verimliliği yüksek yenilikçi bir sistem tasarlanmıştır. Sisteme eklenen ısı geri kazanım eşanjörleri ve depolama tankı yardımıyla enerji verimliliği geliştirilmiştir. Tasarlanan sistemin termodinamik analizleri yapılmıştır. Yeni tasarlanan Sistemin performans katsayısı (COP) 2,75 olarak hesaplanmıştır. Yeni modelin buz çözümü için harcadığı enerji miktarının elektrikli ısıtıcısı kullanan sistemlere oranla %63,6 daha az olduğu görülmüştür. Sistemin ilerleyen aşamalarda güneş enerjisi sistemleri ile birleştirilerek daha verimli hale getirilebileceği öngörülmüştür.

Bilim Kodu : 92808

Anahtar Kelimeler : Defrost, defrost verimliliği, enerji verimliliği, ısı pompası, atık ısı geri kazanım sistemleri

Sayfa Adedi : 43

Danışman : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

DESIGNING AND ANALYSIS OF A NATURAL REFRIGERANT HEAT PUMP SYSTEM

(M. Sc. Thesis)

Mustafa GÜLMEZ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Energy will be among the most important issues of today and perhaps the future. The efficient use of energy and the sum of high-efficiency designs are among the biggest responsibilities of us as engineers. Optimizing heat pump systems is also part of this responsibilities. It is of great importance that refrigerants used in these systems have low global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP). These are the system parameters that will contribute greatly to the characteristics of environmental pollution. In addition, one of the biggest problems of heat pumps is that systems operating in cold environments face the problem of icing which operate at very low efficiency. For the solutions of issued problems above, a system consisting of high usage times provided by these energy sources was designed. The system is optimized with from the heat recovery containing heat exchangers and storage tank. Thermodynamic analyses of the designed system were made. The coefficient of performance (COP) of the new system was calculated as 2.75. It has been observed that the amount of energy consumed by the new model for defrosting is 63.6% less than the systems using electric heaters. It is foreseen that the system can be made more efficient by combining it with solar energy systems in the following stages.

Science Code : 92808

Key Words : Defrost, defrost efficiency, energy efficiency, heat pump, waste
heat recovery systems

Page Number : 43

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarımın her aşamasında bana maddi manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. TEORİK ANALİZ	11
3.1. Isı Pompasının Termodinamiği	11
3.2. Kaynak Çeşitlerine Göre Isı Pompaları.....	13
3.2.1. Hava kaynaklı ısı pompaları.....	13
3.2.2. Su kaynaklı ısı pompaları.....	14
3.2.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları	14
3.2.4. Güneş enerjisi destekli ısı pompaları	15
4. BUZLANMA OLUŞUMU VE BUZ ÇÖZME.....	17
4.1. Buz Çözme Metotları	19
4.1.1. Pasif metotlar	19
4.1.2. Aktif metotlar	22
4.1.3. Sistem defrost uygulamaları.....	28
5. MATERYAL VE METOT	29
5.1. Yeni Tasarlanan Sistemin Termodinamik Analizi	30
5.1.1. Isıtma modu.....	32

	Sayfa
5.1.2. Defrost modu.....	33
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	43



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Sistemin termodinamik analizinde kullanılan parametreler	30
Çizelge 6.1. Analiz sonuçları	35
Çizelge 7.1. Maliyet Tablosu	37



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi	11
Şekil 3.2. Buhar sıkıştırırmalı çevrim P-H diyagramı.....	11
Şekil 3.3. Hava kaynaklı ısı pompası.....	13
Şekil 3.4. Su kaynaklı ısı pompası	14
Şekil 3.5. Toprak kaynaklı ısı pompası.....	15
Şekil 3.6. Güneş enerjisi destekli ısı pompası.....	16
Şekil 4.1. Yüzey üzerindeki buz damlacıklarının oluşumu	18
Şekil 4.2. Buz katmanlarının oluşumu ve ilerleyişi	18
Şekil 4.3. Su taneciklerinin farklı yüzey tipleri üzerindeki davranışı (a) Mikro aşındırma uygulanan alüminyum yüzey (b) Polisaj uygulaması yapılmış düz yüzey	20
Şekil 4.4. Bir yarısı anti-buz kaplaması yapılan metal plaka.....	21
Şekil 4.5. Kaplama yapılan ve yapılmayan yüzeylerin 120 dakika sonundaki durumlarının karşılaştırılması.....	22
Şekil 4.6. Farklı gerilim değerlerine göre yüzeydeki buzlanma formasyonu	24
Şekil 4.7. Elektriksel kutuplaşmanın buz kalınlığı oluşumuna etkisinin belirtildiği grafik.....	25
Şekil 4.8. Ultrasonik titreşim uygulanmadığı durumdaki buzlanma oluşumu.....	26
Şekil 4.9. Ultrasonik titreşim uygulandığındaki buzlanma oluşumu.....	27
Şekil 4.10. Titreşim uygulanan ve uygulanmayan durumlardaki buz kalınlıkları.....	27
Şekil 5.1. Atık ısı geri kazanımına sahip ısı pompası sistemi.....	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\dot{Q}_e$	Evaporatör Gücü (kW)
$\dot{Q}_{koaks}$	Koaksiyel Eşanjörün Gücü (kW)
$\dot{Q}_{kond}$	Kondenser Gücü (kW)
$\dot{Q}_{sub}$	Sub-Cooling İşlemi Sırasında Birim Zamanda Kazanılan Enerji (kW)
$\dot{W}_{komp}$	Kompresör Gücü (kW)
$\dot{W}_{rezistans}$	Elektrikli Isıtıcı Gücü (kW)
$\eta_{d,hotgas}$	Sıcak Gaz Defrost Metodu Verimi (%)
$\eta_{d,rezistanslı}$	Elektrikli Rezistans Metodu Verimi (%)
$\dot{Q}_{hotgas}$	Hotgas Defrost İşlemi Sırasında Gerekli Güç (kW)
$\dot{Q}_{rezistans}$	Rezistansın Defrost İşlemi Sırasında Harcadığı Güç (kW)
$\dot{m}_r$	Soğutucu Akışkanın Kütlesel Debisi (kg/s)
m_{buz}	Buzun Kütlesi (kg)
$t_{kompresör,hotgas}$	Kompresörün Sıcak Gaz Defrost Metodunda Çalışma Süresi (h)
$t_{rezistans}$	Elektrikli Isıtıcının Çalışma Süresi (h)
$\dot{Q}_{eriyen}$	Defrost Sırasında Buzu Eritmek İçin Gereken Güç (kW)
$\dot{E}$	Güç (kW)
h	Entalpi (kJ/kg)
L	Uzunluk (m)
Kısaltmalar	Açıklamalar
CFC	Kloroflorokarbonlar
COP _s	Soğutma Performans Katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CO₂	Karbon-dioksit
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
HCFC	Hidrokloroflorokarbonlar
HFC	Hidroflorokarbonlar
HFO	Hidrofloroolefin
KIP	Küresel Isınma Potansiyeli
ODP	Ozon Delme Potansiyeli



1. GİRİŞ

İnsanlar yaşadıkları ortamlarda konfor şartlarını optimum seviyelere getirebilmek için iklimlendirme sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Fosil yakıtların çevreye vermiş oldukları zararlar göz önüne alındığında, enerji verimliliği yüksek sistemler ile tasarlanacak iklimlendirme sistemlerinin değeri daha iyi anlaşılmaktadır.

Yaşadığımız dönemde karşılaştığımız en önemli sorunlardan birisi olan küresel ısınma ve ona bağlı yaşanan çevre sorunları, enerji kaynaklarının verimli kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Küresel ısınma etkisi ile yer kürenin sıcaklığının 1,3 °C ile 3,6 °C arasında artış göstereceği öngörülmektedir [1].

Doğada ısı geçişi sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama herhangi bir enerji girdisi olmadan kendiliğinden gerçekleşmektedir. Ancak iklimlendirilen ortam sıcaklıkları dış ortamdan daha yüksek olduğu durumlarda, dışarıdaki enerjinin iç ortama aktarılması için uygun bir cihaz kullanılmalıdır. Bu ihtiyacı karşılayacak olan makinelere ısı pompası denilmektedir. Isı pompalarının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [2]:

- Isı pompaları, fosil yakıtlarla çalışan sistemlere göre daha emniyetli sistemlerdir.
- Katı ve sıvı yakıt ile çalışan sistemlere göre daha ekonomik sistemlerdir.
- Fosil yakıtlar ile çalışan sistemler ile karşılaştırıldıklarında bakım maliyetleri daha ucuz olmaktadır. Fosil yakıtlı sistemlerin her yıl yaşadıkları %2'lik performans kaybı göz önüne alındığında ısı pompaları tercih edilmeleri açısından ön plana çıkmaktadırlar.
- Tek bir sistem ile yazın soğutma kışın ısıtma yapılabilmesi sebebiyle, karmaşık sistem tasarımlarına ihtiyaç duymadan talep edilen konfor şartları sağlanabilmektedir.

Çevre kirliliğinin önlenmesi ve gelecek nesillere daha temiz bir Dünya bırakılması amacıyla soğutucu akışkan içeren sistemler için bazı yönergeler, sempozyumlar ve kongreler düzenlenmiştir. Gelecek yıllarda yapılacak tasarımlara yön verecek kararlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Montreal Protokolü, 1987 yılında imzalanan ve 196 ülkenin taraf olduğu bir düzenlemedir. Bu düzenlemenin amacı ozon tabakasına zarar veren maddelerin üretiminin ve kullanımının düzenlemesidir. Protokol ilerleyen yıllarda birçok farklı ülkede (Londra, Kopenhag, Viyana ve Pekin) yoğunlaştırılmıştır [3].
- Kyoto Protokolü, 1997 yılında 163 katılımcı ülke ile imzalanan bir protokoldür. Kyoto protokolünün temel hedefi küresel ısınmaya ve sera etkisine sebep olan azot, karbon monoksit, metan, hidroflorokarbon ve florokarbon gibi zararlı gazların azaltılmasıdır. Kyoto protokolü ile taraf olan ülkeler sera gazı emisyonlarını %5 oranında azaltmayı taahhüt etmişlerdir. Türkiye Kyoto protokolüne 2009 yılında taraf olarak katılan ülkeler arasında yer almıştır [4].
- F-Gaz 842/2006 sayılı tüzük, eski F-Gaz yönetmeliği temel olarak iki eylem planını takip etmektedir. Bunlardan ilki F-Gaz içeren ekipmanlarda oluşacak sızıntıların önlenmesi ve iyileştirilmesi olmaktadır. Bu noktada alınan önlemler şunları içermektedir. Florlu gazlar ile çalışan makinelerde yapılacak bakım işlemlerinde gazların uygun şekilde toplanması, eğitilmiş ve sertifikalı personel yetiştirilmesi ve bu gazlar ile çalışan firmaların sertifikalandırılması olmaktadır. Diğer uygulama ise F-Gaz ile ilgili tüm ithalat, ihracat ve taşımacılık faaliyetlerinin raporlanarak, etiketlenerek bu uygulamaların takip edilmesi olarak belirtilmiştir [5].
- Avrupa Parlamentosu 2037/2000 sayılı tüzük, Avrupa birliği ülkeleri tarafından çıkarılan yönerge doğrultusunda ozon tabakasına ve atmosfere zarar veren maddelerin emisyonlarının azaltılmasını amaçlayan yönetmeliktir. Bu yönetmeliğin temel hedefi, Cloroflorokarbon (CFC) ve Hidrokloroflorokarbon (HCFC) içeren sistemlerin sızıntılarının önlenmesi ve bakım faaliyetlerinin düzenli olarak gerçekleştirilmesi konusunda yol göstermektedir. Bu konuda ilgilenen personelin nitelikli personel olması vurgulanmıştır [6].
- F-Gaz yönetmeliği 517/2014, bu yönetmelik 2006 yılında yayınlanan 842 numaralı tüzüğün yerini almıştır. Tüm AB ülkelerinde resmi olarak 20 Mayıs 2014 yılında yayınlanarak kabul edilmiştir. Yönetmelik; HFC türü soğutucu akışkanların kullanımının azaltılması, yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip (KIP) soğutucu akışkanların kullanımının azaltılmasını hedeflemektedir. Ayrıca F-Gaz yönetmeliği, sera gazları barındıran hidroflorokarbon (HFC) gibi soğutucu akışkanların işletme ve servis bakımı konusunda sorumluluklar yüklemektedir. Bazı cihazlar için otomatik kaçak kontrolünü zorunlu kılmaktadır [7].

Yapılan tüm araştırmalar ve çalışmalar göstermektedir ki; gelecek nesillere daha temiz bir evre bırakabilmek için bizler şimdiden sorumluluk alarak çevreye en az hasarı verecek sistemlerin tasarımları üzerinde alışmalıyoruz.

Bu tez çalışmasında küresel ısınma potansiyeli (KIP) ve ozon delme potansiyeli (ODP) düşük, doğal soğutucu akışkan R290 (propan) kullanılarak yenilikçi bir ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem ile defrost veriminin artması ile enerji verimliliği sağlanması ve sistemin COP 'sinde artış hedeflenmiştir.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki çalışmalar incelenmiştir. Farklı ısı pompası uygulamaları, doğal soğutucu akışkanlar ile çalışan ısı pompaları, güneş enerjisi destekli sistemler, ısı pompalarında enerji depolama, sistemde buzlanmanın oluşumu, süreçleri ve defrost metotları ile ilgili kaynaklar taranmıştır.

Song M. ve diğerleri (2018), hava kaynaklı ısı pompalarındaki defrost metotları üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma 5 farklı defrost metodu üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışmadaki defrost yöntemleri sırasıyla; sıcak hava akımı ile defrost metodu, elektrik rezistanslı defrost metodu, sıcak su püskürtmeli defrost metodu, sıcak gaz bypass defrost ve ters çevrime sahip defrost metotlarıdır. Ters çevrime sahip defrost yöntemi aralarında en verimli olduğu bildirilmiş ve bu defrost yöntemine 6 farklı iyileştirme yöntemi sunulmuştur [8].

Park ve Jung (2007), yapmış oldukları araştırmada; etan ve propan (R170/R290) gazlarının karışımları ile çalışan su kaynaklı ısı pompasının performansını analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada farklı kompresör çıkış sıcaklıklarının etkileri gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre; çıkış sıcaklığındaki azalmanın daha az termal stres oluşturduğunu ve kompresör ömrünü artırdığını belirtmişlerdir [9].

Shen ve diğerleri (2019), araştırmalarında faz değiştiren malzeme (FDM) kullanılan hava kaynaklı ısı pompası sistemindeki defrost verimliliğini araştırmışlardır. Sıcak gaz bypass ve ters çevrimli defrost yöntemleri üzerinde karşılaştırmalı analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu metotların her ikisinde de faz değiştiren malzeme kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki sonuçları gözlemlemişlerdir. Her iki metot üzerinde yapılan çalışma göstermiştir ki faz değiştiren malzemenin eklendiği sistemlerin defrost verimliliğinde artış gözlenmiş ve defrost süresi kısalmıştır [10].

Moallem ve diğerleri (2013) ısı değiştiricileri yüzeylerinde oluşan buzlanmayı ve bunları engellemek için uygulanabilecek kaplamaları araştırmışlardır. Hidrofilik ve Hidrofobik kaplamaların sonuçları analiz edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; hidrofobik kaplama uygulamasında buzlanmanın 13 dakikada oluştuğu, hidrofilik kaplama uygulandığında ise

20 dakikada oluştuğu belirtilmiştir. Buna göre hidrofilik yüzeyler %4,5 oranında daha iyi performans göstermiştir [11].

Erten ve Uludağ (2019), R404a ve R290 kullanan ısı pompalarının enerji verimlilik analizlerini ve performans karşılaştırmalarını yapmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre R404a bulunan sistemlerin R290 sistemlerine göre %12 daha fazla enerji tükettiğini belirtmişlerdir [12].

Arslan ve diğerleri (2021), R449a ve R290 soğutkanlarını kullanan sistemlerin enerji, ekserji ve performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında R290 kullanan sistemlerin R449a sistemlerine göre verimlilikleri %24,12 oranında fazla çıkmıştır. Çevreye olan etkiler incelendiğinde R449a sistemlerinin %26,22 daha fazla CO₂ yaydığı gözlenmiştir [13].

Ji ve diğerleri (2008), Güneş enerjisi destekli bir ısı pompası tasarımının incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Yer altı kaynağı ile destekledikleri bu sistemi, düşük radyasyon yükleri altında deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Yapılan deneysel araştırma sonucunda, yer altı kaynağı ile desteklenmiş güneş enerjili ısı pompası sisteminin performans katsayısı (COP) değerini 5,4 olarak hesaplamışlardır [14].

Şevik ve diğerleri (2011), Tasarlamış oldukları sistemde endüstriyel kurutma prosesi için kullanılan bir sistemin güneş enerjili ısı pompası sistemi ile desteklenmesini araştırmışlardır. Sistemin tasarımında oransal-integral-türevsel (PID) kontrolcü kullanarak, enerji verimlilik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tasarlamış oldukları sistemin sera ısıtma sistemlerine, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerine entegre edilerek, enerji giderlerinin düşürülebileceğini belirtmişlerdir [15].

Kim ve diğerleri (2018), Yapmış oldukları çalışmada sıcak su ısıtma sistemleri için kullanılan geleneksel güneş enerjisi destekli ısı pompaları ile seri ve paralel bağlı güneş enerjili sistemleri karşılaştırmışlardır. Ayrıca hibrit yapıdaki güneş enerjisi panelleri kullanarak da bir karşılaştırma yapmışlardır. Seri bağlı güneş enerjisi sistemlerinin yıllık ortalama performans katsayılarını (COP) 3,17 ve paralel bağlı güneş kolektörlü sistemin ise 4,56 olarak hesaplamışlardır. Hibrit yapıdaki güneş kolektörlü ısı pompasının yıllık ortalama performans katsayısını (COP) 3,67 olarak belirtmişlerdir [16].

Banjac (2015), Isıtma ve soğutma için kullanılacak güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminin tasarımı üzerine çalışma yapmıştır. Bu sistemde yer altına gömülü bulunan bir depolama tankında enerji depolanarak, fan-coil sistemi ile iklimlendirme sağlanmıştır. Sistemin ısıtma ve soğutma performans katsayıları sırasıyla 4,2 ve 3,4 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca araştırma sonuçlarına göre toprak altına gömülü olan tankın, gömme derinliğinin de sistem verimi üzerine etkili olduğunu belirtmişlerdir [17].

Atmaca ve Koçak (2014), Antalya ili için güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminin mahal ısıtması amacıyla kullanımı üzerinde araştırma yürütmüşlerdir. Yapılan araştırmaya göre tüm sistemin performans katsayısı (COP) 2,31 ve ısı pompasının performans katsayısı (COP) 3,01 olarak belirtilmiştir. Sistem ve ısı pompası için yapılan ekserji verimlilikleri sırasıyla 69,85% ve 82,62% olarak hesaplanmıştır [18].

Huang ve diğerleri (2014) yapmış oldukları çalışmada dış üniteye bulunan düz, dalgalı ve panjur kanatlı yüzeyleri karşılaştırarak, buzlanma ve buz çözmenin konut tipi hava kaynaklı ısı pompasının performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, düz yüzeyli kanatçıkların en iyi termal performansa sahip olduğunu, ardından sırasıyla dalgalı ve panjur kanatçıkların geldiğini göstermiştir. Buzlanma döngüsü sırasında düz kanatçık için zaman ortalamalı ısıtma kapasitesi, COP ve giriş gücü, panjur kanatçığına göre sırasıyla 17.1%, 9.0% ve 7.6% artırılmıştır [19].

Liu ve diğerleri (2006) donma önleyici olarak hazırlamış oldukları yeni bir boya türü ile kaplama yapılmamış metal yüzeyin buzlanma performansını araştırmışlardır. Boya kaplaması yapılan yüzeyden alınan test sonuçlarına göre, don oluşumunun en az 15 dakika geciktiğini gözlemlemişlerdir. Diğer bir yandan oluşan don tabakasının kalınlığının 40%'tan fazla azaltıldığını ancak ağırlığın kaplama yapılmayan bakır yüzeye göre 40 %'tan fazla arttığını belirtmişlerdir. Kaplanmış yüzeyler, bağıl nem bağıl neminin 60 %'ın altında ve soğuk levha yüzey sıcaklığının -10 °C'nin üzerinde olması koşuluyla dondan arındırılmıştır. Buna karşılık, kaplanmamış yüzey tamamen kalın ve yoğun don tabakası ile kaplanmıştır [20].

Hoffenbecker ve diğerleri (2005) yapmış oldukları çalışmada hava soğutmalı bir buharlaştırıcı üzerinde zamana bağlı simülasyon uygulamaları yürütmüşlerdir. Gönderilen sıcak gazın derecesine bağlı olarak buzlanmanın çözülme kapasitesinde artma olduğunu

gözlemlemişlerdir. Bu uygulama ile defrost süresinin 5.7% oranında azaldığını ve COP değerinin de 8.5% arttığını belirtmişlerdir [21].

Bin Hu ve diğerleri (2014) yapmış oldukları çalışmada kritik bölge üzerinde çalışan CO₂ ısı pompasının sıcak gaz by-pass metodu ile defrost analizini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Buzlanmanın kompresör üzerinde enerji tüketim noktasında olumsuz etki gösterdiğini ve sıcak gaz by-pass uygulaması yapılan sistemin konvansiyonel sistemlere göre 30% ile 40% arasında daha az enerji tükettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sıcak gaz by-pass uygulamasının maliyet etkin bir çözüm olarak sisteme eklenebilecek basit ekipmanlarla verimliliği artırıcı bir uygulama olduğunu vurgulamışlardır [22].

Zhang ve diğerleri (2016) yapmış oldukları çalışmada R290 (propan) soğutucu akışkanı ile çalışan bir ısı pompasında, iç ünite ve dış ünite çalışma basınçlarının R290 gazının patlama basıncının üzerinde olduğu durumlardaki sonuçlarını incelemişlerdir. Sistemin bazı kısımlarında ufak çatlaklarda oluşan genel yanmaların sistem güvenliğini tehlikeye atmadığını belirtmişlerdir [23].

Li (2014) araştırmasında R290 (propan) gazı ile çalışan sistemlerde yaşanabilecek sızıntılar ile ilgili çalışma yapmıştır. Bu çalışmalarda farklı koşullar altında sistemde oluşabilecek kaçakları ve bu kaçakların sistem güvenliği üzerindeki etkilerini araştırmak için deneyler gerçekleştirmiştir [24].

Tang ve diğerleri (2018) yapmış oldukları çalışmada R290 (propan) gazı ile çalışan bir ısı pompasının, ısıtma modunda çalıştırıldığında duvar ile ısı pompası arasındaki mesafenin sistem ve çevre güvenliğini etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Bu durumun iyileştirilmesi için selonoid vananın yakınına yerleştirilecek kapiler boru için yeni bir method önermişlerdir. Böylelikle herhangi bir kaçak anında yangın riskinin azaltılabileceğini belirtmişlerdir [25].

Jierong ve Tingxun (2018) yaptıkları çalışma ile R290 (propan) gazının dinamik sürüklenme karakteristiği üzerine araştırma yapmışlardır. Araştırmanın sonuçlarına göre; büyük deplasman, düşük miktarlarda kütle şarjı ve evaporatöre oranla daha yüksek bir kondenser hacmi bulunan sistemlerin, ciddi oranda değişen dış koşullarda bile ilk başlangıç enerji tüketimlerinin azaltıldığını ve sistem verimliliğinin artırıldığını belirtmişlerdir [26].

Qu ve diğerkleri (2017) yaptıkları çalışma ile termal ısı depolamalı sistem temelli defrost uygulamaları üzerine çalışma yapmışlardır. Burada kaskad olarak tasarlanan ısı pompaları üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Enerji depolama uygulaması yapılan sistemlerde defrost süresinin 71,4-80,5% arasında azaldığını ve defrost sırasındaki enerji tüketiminin sıradan sıcak gaz by-pass uygulamalı sistemlere göre 65,1-85,2% arasında azaltıldığını belirtmişlerdir [27].

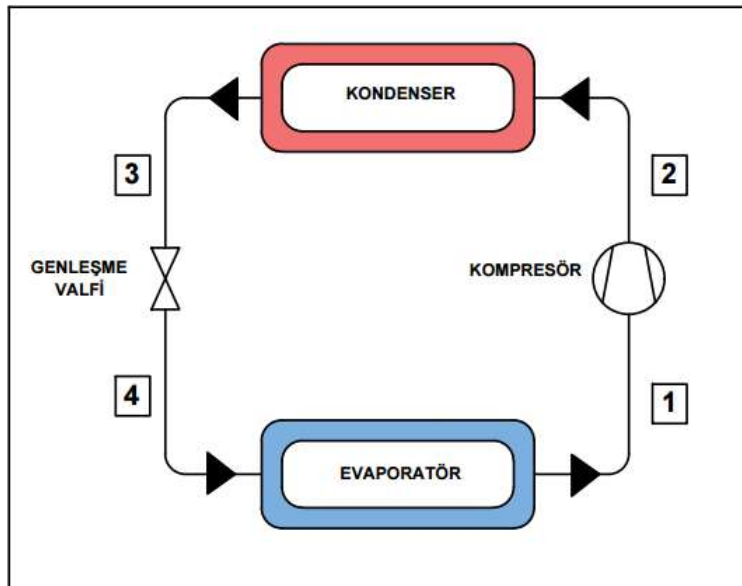
Ozsipahi ve diğerkleri (2022) yapmış oldukları çalışmada R290/R600 soğutucu akışkanları ile çalışan ev tipi bir soğutma cihazının farklı oranlardaki soğutucu akışkan karışımlarındaki enerji verimliliği üzerine deneysel analizler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında R290 karışımını 40-70% oranlarında değiştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre R290 miktarı artırıldıkça sistemin enerji tüketiminin arttığını gözlemlemişlerdir, ancak bunun yanında kütleel debinin artmasından dolayı COP değerinde bir artış kaydetmişlerdir. Çalışmalarda optimum enerji verimliliği üzerine yaptıkları gözlemlerde, hermetik kompresörün en verimli çalıştığı değerin 2100 rpm olduğunu da kaydetmişlerdir [28].



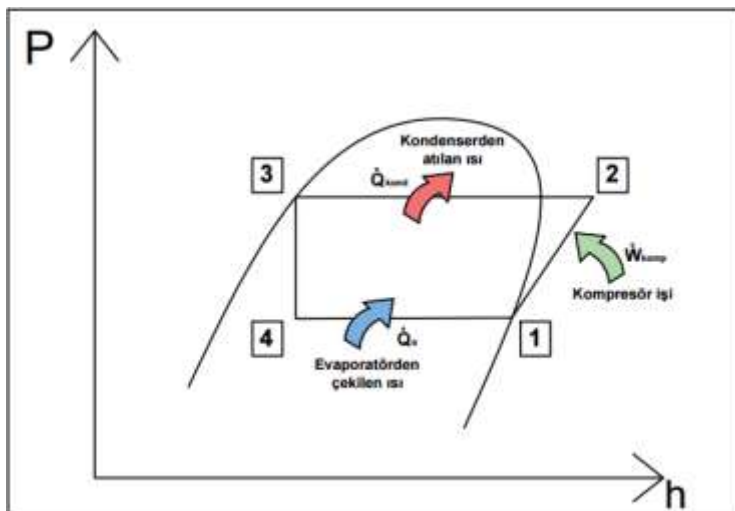
3. TEORİK ANALİZ

3.1. Isı Pompasının Termodinamiği

Isı pompası sistemlerinde ve soğutma cihazlarında ideal buhar sıkıştırırmalı çevrim kullanılır. Bu çevrim; kompresörde izantropik sıkıştırma (1–2), yoğuşturucuda çevreye sabit basınçta ısı verilmesi (2–3), genleşme valfinde kısılma (3–4), buharlaştırıcıda sabit basınçta ısı alınması (4–1) ile çevrim tamamlanır. Sistemin genel tasarımı Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. Sistemin P-h diyagramı Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İdeal buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi



Şekil 3.2. Buhar sıkıştırırmalı çevrim P-h diyagramı

Buharlaştırıcı, kompresör ve yoğuşturucu kapasiteleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_r(h_1 - h_4) \quad (3.1)$$

$$\dot{W}_{\text{komp}} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{kond}} = \dot{m}_r(h_2 - h_3) \quad (3.3)$$

Sistemdeki zamana bağlı enerji değişimi için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\sum \dot{E}_{\text{giren}} - \sum \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (3.5)$$

Isı pompasının geri ödeme süresi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{İlk Yatırım Maliyeti}}{\text{Karlılık}} \quad (3.6)$$

Isı pompasının performans katsayısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{kond}}}{\dot{W}_{\text{komp}}} \quad (3.7)$$

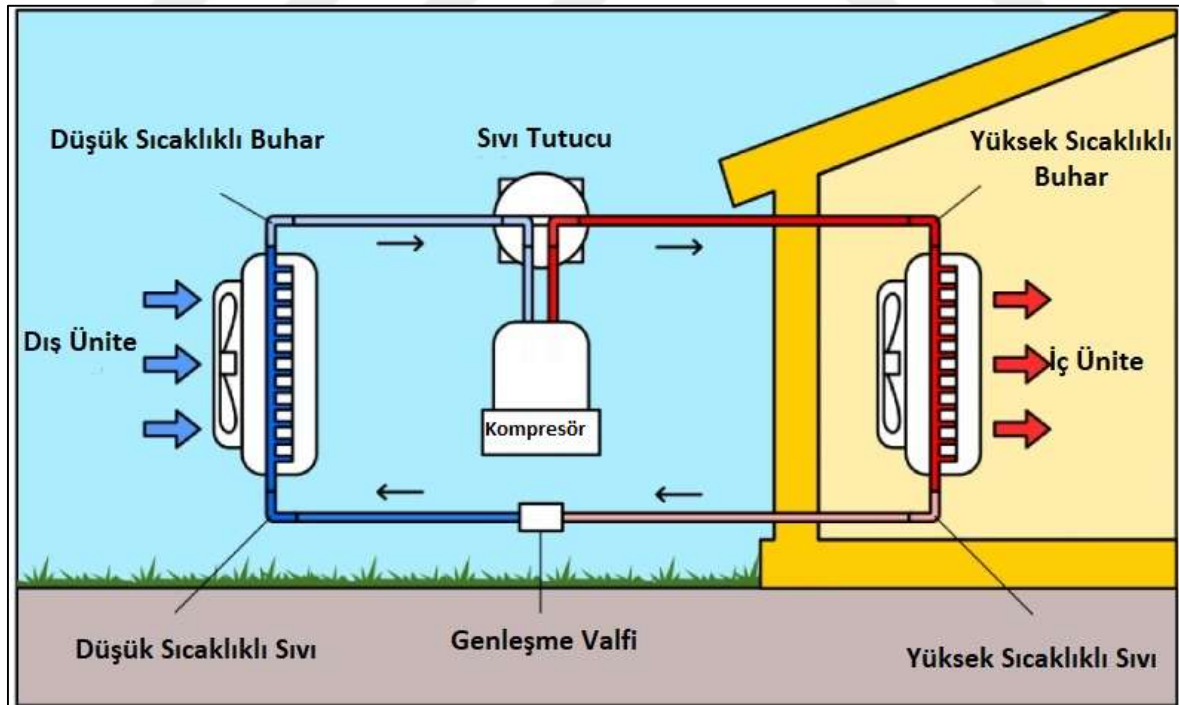
3.2. Kaynak Çeşitlerine Göre Isı Pompaları

Doğada ısı geçişi sıcak kaynaktan soğuk kaynağa kendiliğinden gerçekleşmektedir. Ancak bunun tersi de mümkündür. Bir sisteme enerji verilerek soğuk kaynaktaki ısı sıcak kaynağa aktarılabilmektedir. Bu şekilde çalışan makinalara ısı pompası ya da ısı makinası adı verilmektedir.

Isı pompaları kullanıldığı yere ve kaynak çeşitlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

3.2.1. Hava kaynaklı ısı pompaları

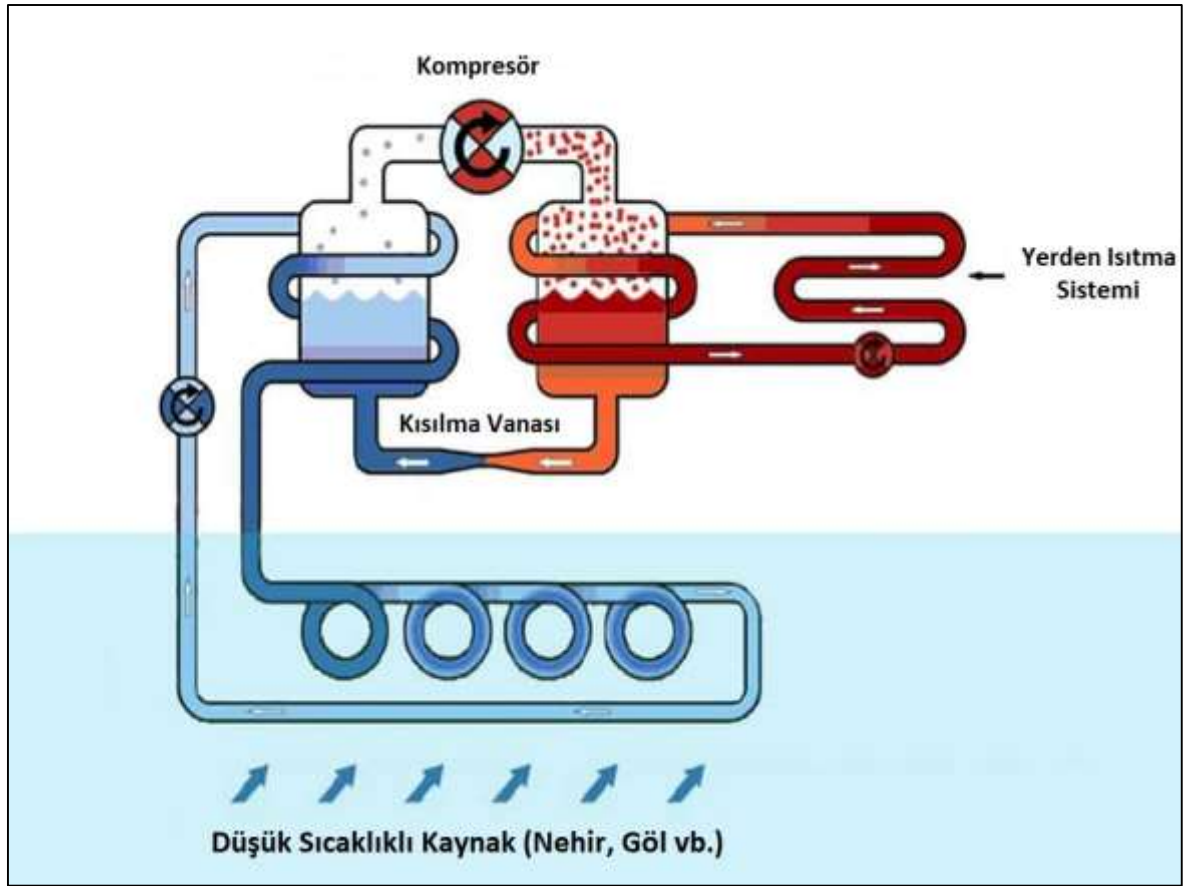
Hava kaynaklı ısı pompaları ısı enerjisinin dış ünite yardımıyla atmosfer havasından alınarak iç üniteyle şartlandırılmak istenen ortama aktaran cihazlardır. Bu ısı pompalarının en büyük avantajı hızlı rejime girerek, şartlandırılacak ortamı istenen iklim şartlarına hızlıca getirebilmeleridir. Dış hava kaynaklı ısı pompalarının en büyük dezavantajlarından birisi olan buzlanma sorunu, konfor eksiklikleri ve verimlilik kaybı oluşturmaktadır.



Şekil 3.3. Hava kaynaklı ısı pompası [29]

3.2.2. Su kaynaklı ısı pompaları

Su kaynaklı ısı pompaları nehir, göl ve akarsu benzeri su kaynaklarının kullanılarak, ısıtılacak ortama enerjinin bu kaynaklardan alındığı sistemlerdir. Hava kaynaklı ısı pompalarından farklı olarak dış havada oluşacak iklim değişikliklerinden etkilenmezler. Bu tip ısı pompalarının en büyük dezavantajları kurulumunun gerçekleştirilebilmesi için yakınlarında yeterli miktarda (hacimde veya debide) su kaynağının bulunmasının zorluğu olarak gösterilebilir.

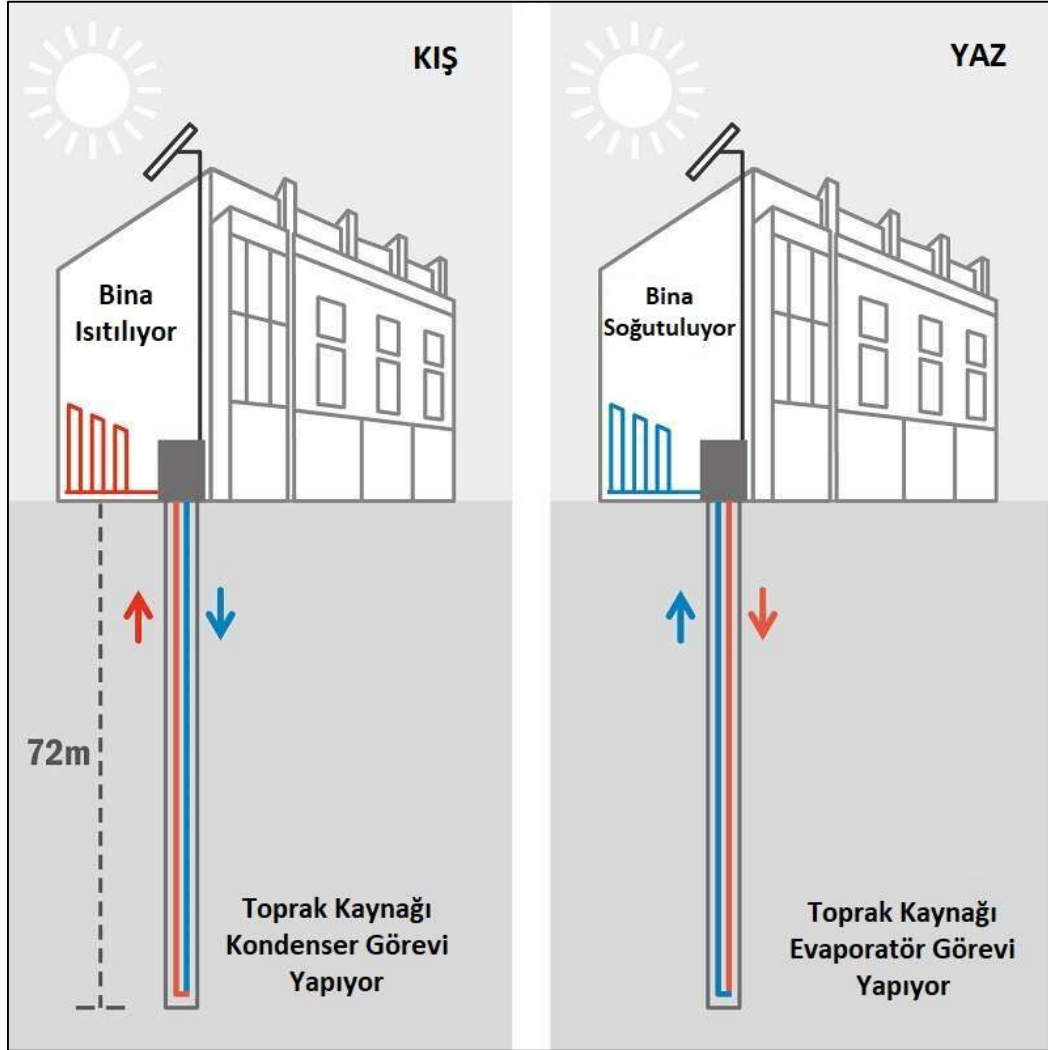


Şekil 3.4. Su kaynaklı ısı pompası [30]

3.2.3. Toprak kaynaklı ısı pompaları

Toprak kaynaklı ısı pompaları, iklimlendirilecek ortam için ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin toprağa yerleştirilen borular yardımıyla iç mahalde kullanılan cihazlara aktarıldığı sistemlerdir. Toprağa yerleştirilen boruların evaporatör görevi görerek ısıyı çekme prensibine göre çalışmaktadır. Toprak sıcaklığının yaz-kış sabit olması sebebiyle mevsim

değişikliklerinde verim kaybının olmaması en büyük avantajlarından. Dezavantaj olarak yüksek sistem kapasiteleri için büyük miktarlarda toprak alanına ihtiyaç duyması gösterilebilir.

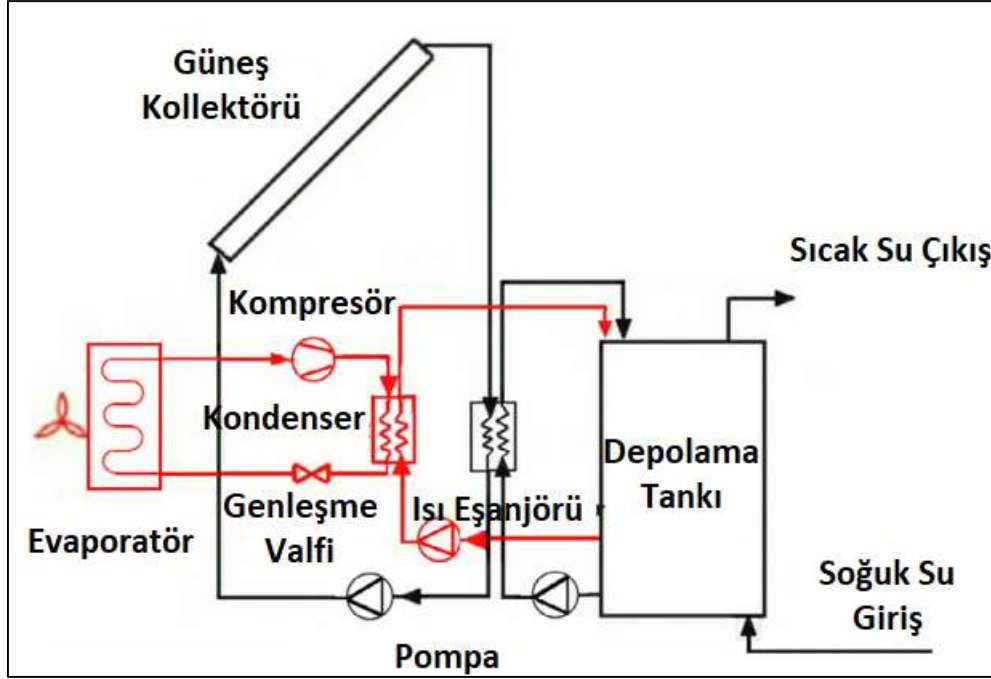


Şekil 3.5. Toprak kaynaklı ısı pompası [31]

3.2.4. Güneş enerjisi destekli ısı pompaları

Güneş enerjisi destekli ısı pompaları üç şekilde tasarlanmaktadır. Burada farklı kolektör çeşitlerinin kullanılması ile sistem tasarlanmaktadır. Bu kolektörler sıcak su üreten panelli, fotovoltaik panelli ve hibrit panelli olarak belirtilebilir. Sıcak su üreten paneller; depoladıkları sıcak suyu, ısı pompasının evaporatörüne göndererek enerji kaynağı sağlamaktadır. Fotovoltaik panel kullanılan sistemlerde; üretilen elektrik enerjisi ısı pompasının çalışması için kullanılmakta ve böylelikle verimlilik artırılmaktadır. Hibrit

paneller ise hem sıcak su üretimi hem de elektrik üretimi yapabilmesi sayesinde, ısı pompasının evaporatörüne sıcak su enerjisinin aktarımı ve elektrik gücünün de sağlanması sebebiyle en verimlileri olmaktadır. Güneş enerjisi destekli ısı pompalarının dezavantajı olarak; hava şartlarına bağımlılığının (güneşe ihtiyaç duymaları) fazla olması gösterilebilir.

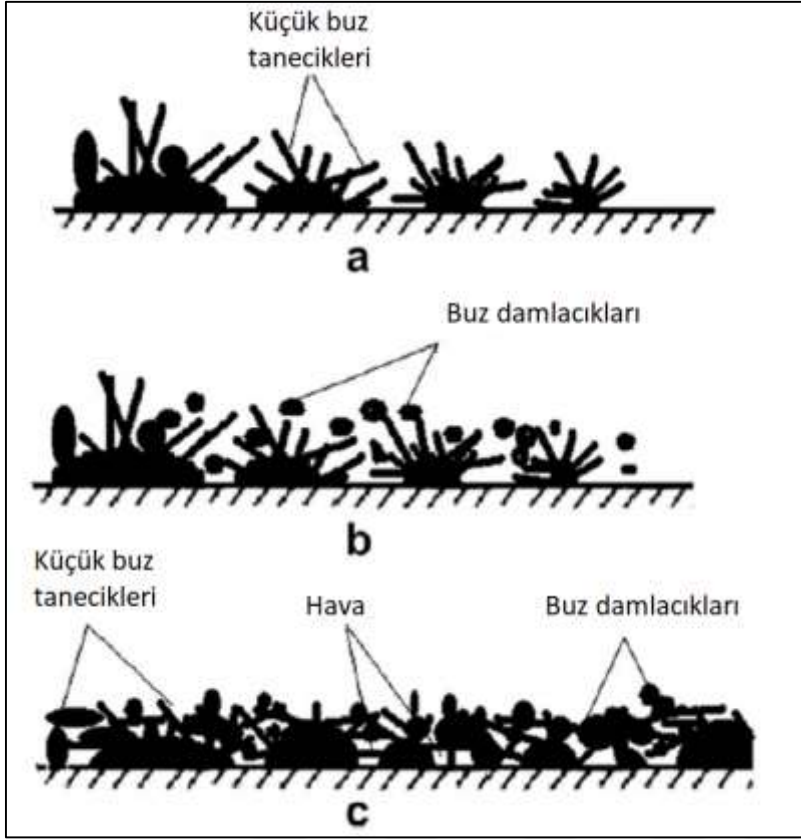


Şekil 3.6. Güneş enerjisi destekli ısı pompası [32]

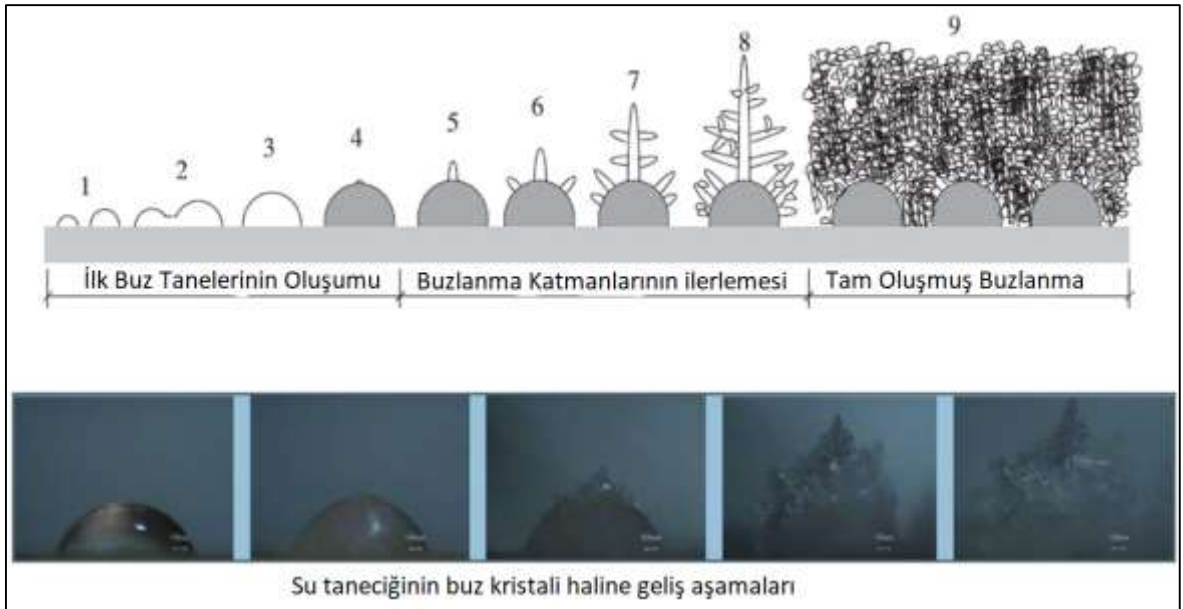
4. BUZLANMA OLUŞUMU VE BUZ ÇÖZME (DEFROST)

Buzlanma oluşumu; ısı pompalarında kullanılan fin yapılı evaporatörlerde performans kaybına yol açtığı için dikkate alınması gereken bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Evaporatör yüzey sıcaklığının 0 °C olduğu ve aynı zamanda çiğlenme sıcaklığının altına düştüğü durumlarda, yüzey üzerinde buzlanmalar oluşmaya başlamaktadır. Diğer bir değişle evaporatörün üzerinden geçen hava tanecikleri içerisinde bulunan su taneciklerinin soğuk yüzeylere teması ile yüzeyde buz tanecikleri meydana gelmektedir. Buradaki kritik parametrelerden bir tanesi havanın bağıl nem seviyesidir. Havanın bağıl neminin artması buzlanma miktarını artırmaktadır. Buna ek olarak yüzey sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki farkın arttığı durumlarda, buzlanma hızında artış görülmektedir.

Buzlanma üzerine yapılmış deneysel bir çalışmada; hava sıcaklığı -7 °C ile 5,5 °C arasında ve bağıl nem değeri 60%'nin üzerinde olduğu durumlarda, yüzey üzerindeki buzlanma oluşumunun hızlandığı belirtilmiştir [33]. Buzlanmanın sistem performansı üzerindeki etkileri ilk başlarda ihmal edilebilir seviyelerde olmaktadır. Ancak ilerleyen süreçlerde buz tanecikleri evaporatör yüzeyi üzerinde birikmeye başlamakta ve kanatçıkları aralarının kapanmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda hava akış hızı azalarak, evaporatörün performansı düşmeye başlamaktadır. Buzlanmanın bir diğer olumsuz etkisi de boru üzerinde oluşan katman sonucunda direnç oluşturmaktır. Oluşan direnç sebebiyle borudaki ısı transfer hızı düşerek, evaporatör performansı olumsuz yönde etkilenmektedir.



Şekil 4.1. Yüzey üzerindeki buz damlacıklarının oluşumu [34]



Şekil 4.2. Buz katmanlarının oluşumu ve ilerleyişi [34]

Yüzey üzerindeki buzlanmanın oluşum aşamaları ve katmanlar halinde ilerleyişi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 ile gösterilmektedir. Burada su tanecikleri öncelikle soğuk yüzey üzerinde küçük buz tanecikleri olarak lokal topak şeklinde oluşmaktadır. İlerleyen aşamalarda buz

tanecikleri katmanlar halinde birleşerek büyümektedir. Katmanlar arasında hava kabarcıklarının kaldığı görülmektedir. Bu hava kabarcıkları sistemin ısı transferine olumsuz yönde etki etmektedir [34]. Bu sebeple soğuk yüzeylerdeki buzun bertaraf edilmesi sistem performansının artırılması ve konfor şartlarının istenen seviyeye gelmesi için önem arz etmektedir. Buzlanmanın giderilmesi ile ilgili kullanılan metotlar bulunmaktadır. Bunlar ile ilgili detaylar aşağıdaki başlıklar altında incelenecektir.

4.1. Buz Çözme Metotları

Buzlanma oluşumu ısı transferini azaltacağından dolayı sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple, eğer yüksek verimde bir buz çözme operasyonu hedefleniyor ise defrost işlemi yüzey alanının 45%'sinden daha azındayken başlaması uygun olacaktır. Buz çözme işlemleri ile ilgili farklı metotlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aktif metotlar; yani sistem içerisine eklenecek aktif komponentler yardımıyla yapılan ve enerji gereksinimi duyulan metotlardır. Aktif metotlara örnek olarak; elektro hidrolik, titreşim, ultrasonik vibrasyon, sıcak gaz by-pass, elektrikli ısıtıcı metotları gibi yöntemler verilebilir. Diğer metotlar ise pasif metotlar olarak geçmektedir. Pasif metotlar; Aktif metotların tersine enerji girdisine ihtiyaç duymadan yüzeyde yapılacak iyileştirmeler ya da kaplamalar ile buzlanmanın geciktirilmesine odaklanmaktadır. Böylelikle enerji ihtiyacı olmadığı için sistem performansının artırılması hedeflenmektedir.

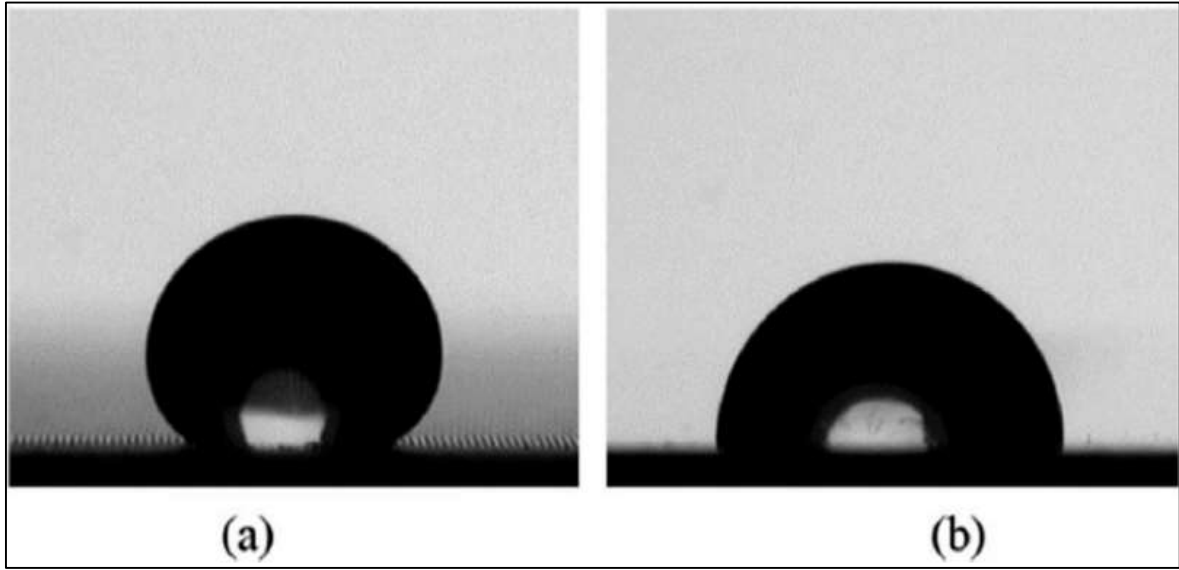
4.1.1. Pasif metotlar

Pasif metotlar; buzlanma durumlarının engellenmesi ya da geciktirilmesi amacıyla evaporatörün yüzey morfolojisi ile ilgili işlemleri içermektedir. Bunlara yüzey üzerine uygulanabilecek kaplamalar, geometride yapılacak şekil değişiklikleri vb. uygulamalar örnek verilebilir.

Morfolojik değişim ve kaplama uygulamaları

Yüzey işlemleri; yüzeyin şeklinin, yapısının, geometrisinin ya da kaplamasının değiştirilmesi şeklinde olabilmektedir.

Rahman ve Jacobi (2015) mikro aşındırılmalı yüzeyler üzerine yapmış oldukları çalışmalarında alüminyum (Al) ve bakır (Cu) yüzeylerin asit aşındırması metodu ile aşındırılarak pürüzlü yüzey haline getirildiği bir çalışmanın deneysel incelemelerini gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma ile aşındırma yapılmış yüzeyler ve herhangi bir işlem yapılmamış yüzeyler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları daha önce pirinç malzemesi ile yaptıkları çalışma ile tutarlılık göstermektedir [35].



Şekil 4.3. Su taneciklerinin farklı yüzey tipleri üzerindeki davranışı (a) Mikro aşındırma uygulanan alüminyum yüzey (b) Polisaj uygulaması yapılmış düz yüzey [35]

Şekil 4.3 incelendiğinde (a) resmindeki yüzeyin asit uygulaması ile aşındırma yapıldığı görülmektedir. Aşındırma yöntemi sonucunda oluşan yüzey formasyonunun yüzeye dik şekilde oluştuğu görülmektedir. Bunun sonucunda yüzeye düşen su damlacıkları daha toplu halde (yayvan değil) kalmaktadır. Bu sebeple yüzeye temas eden ısı transfer yüzeyi daha küçük olmaktadır. Diğer yüzey tipi (b) incelendiğinde; yüzeye herhangi bir uygulama yapılmamış, sadece polisaj uygulaması yapılmıştır. Burası üzerinde bulunan su taneciği incelendiğinde; (a) yüzeyi üzerindeki taneciğe göre daha yayılı şekilde bulunduğu görülmektedir. Bu şekil taneciğin yüzeye temas eden alanını artıracak ve bu sebeple buz taneciklerinin oluşum hızı artmış olacaktır. Bu farklı yüzey yapılarının buzun çözülmesi aşamasında da gösterdikleri performansın farklı olduğu belirtilmiştir. Aşındırma uygulanmış yüzeyde taneciklerin tutunma alanı daha küçük olması sebebiyle buzun çözülme anında taneciklerin yüzeyden ayrılması daha kolay olmaktadır. Aşındırma yapılmış yüzey ile farklı bağıl nemlerde yapılan gözlemlerde, defrost döngülerinin daha kısa olduğu belirtilmiştir. Bu

defrost süresinin kısılmasına ve böylelikle defrost için harcanan enerjinin daha az olması sebebiyle sistem performansının artmasına olumlu yönde etki etmektedir [36]. Rahman ve Jacobi (2015) tarafından yapılan bir diğer çalışmanın sonucu olarak, aşındırılmış yüzeylerin herhangi bir işlem uygulanmamış yüzeylere göre daha az enerji harcadığını belirtmişlerdir. Test sonuçlarına göre; aşındırılmış yüzeyden birim zamanda uzaklaştırılan erimiş su miktarı diğer yüzeye göre 30-45% daha fazla olmaktadır [37].

Buzlanmaya karşı uygulanan bir başka metot ise ısı transfer yüzeylerinin anti-buz kaplaması yapılarak korunması olmaktadır. Liu ve diğerleri (2006) yapmış oldukları çalışmada; metal bir yüzeyin bir kısmını buzlanmaya karşı korumalı malzeme ile kaplamışlardır. Kaplama yapılan metal plaka Şekil 4.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bir yarı anti-buz kaplaması yapılan metal plaka [38]

Yapılan testlerin sonuçları incelendiğinde buzlanma zamanının 15 dakika kadar geciktirildiği belirtilmiştir. Diğer yandan buz kalınlığının da 40% oranında daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Hava sıcaklığının $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında ve bağıl nemin 60% değerinden daha az olduğu durumlarda yüzeyde buzlanma görülmediği belirtilmiştir. Bunun aksine kaplanma

yapılmayan yüzeyin yoğun ve kalın bir buz katmanı ile kaplandığını gözlemlemişlerdir [36]. İki saatlik bir çalışmanın sonunda yüzeyler üzerinde oluşan buz katmanı Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Kaplama yapılan ve yapılmayan yüzeylerin 120 dakika sonundaki durumlarının karşılaştırılması [38]

Yüzey kaplamalarının buzlanmayı geciktirici etkileri olumlu yönde olurken, sistemi olumsuz yönde etkiledikleri bir durum araştırmacılar tarafından fark edilmiştir. Kaplama uygulandığında yüzey karakteristiği daha hidrofilik özellik göstermekte, yani yüzeye tutunan damlacıkların tutunma enerjisi daha fazla olmaktadır. Bu durum defrost işlemi esnasında eriyen su damlalarının yüzeyden daha geç uzaklaşmasına ve defrost süresinin uzamasına sebep olduğu fark edilmiştir.

4.1.2. Aktif metotlar

Aktif metotlar pasif metotlardan farklı olarak, sistem içerisine eklenecek aktif komponentler yardımıyla yapılan ve enerji gereksinimi duyulan metotlardır. Aktif metot örnekleri aşağıdaki konu başlıkları içerisinde detaylı olarak incelenecektir.

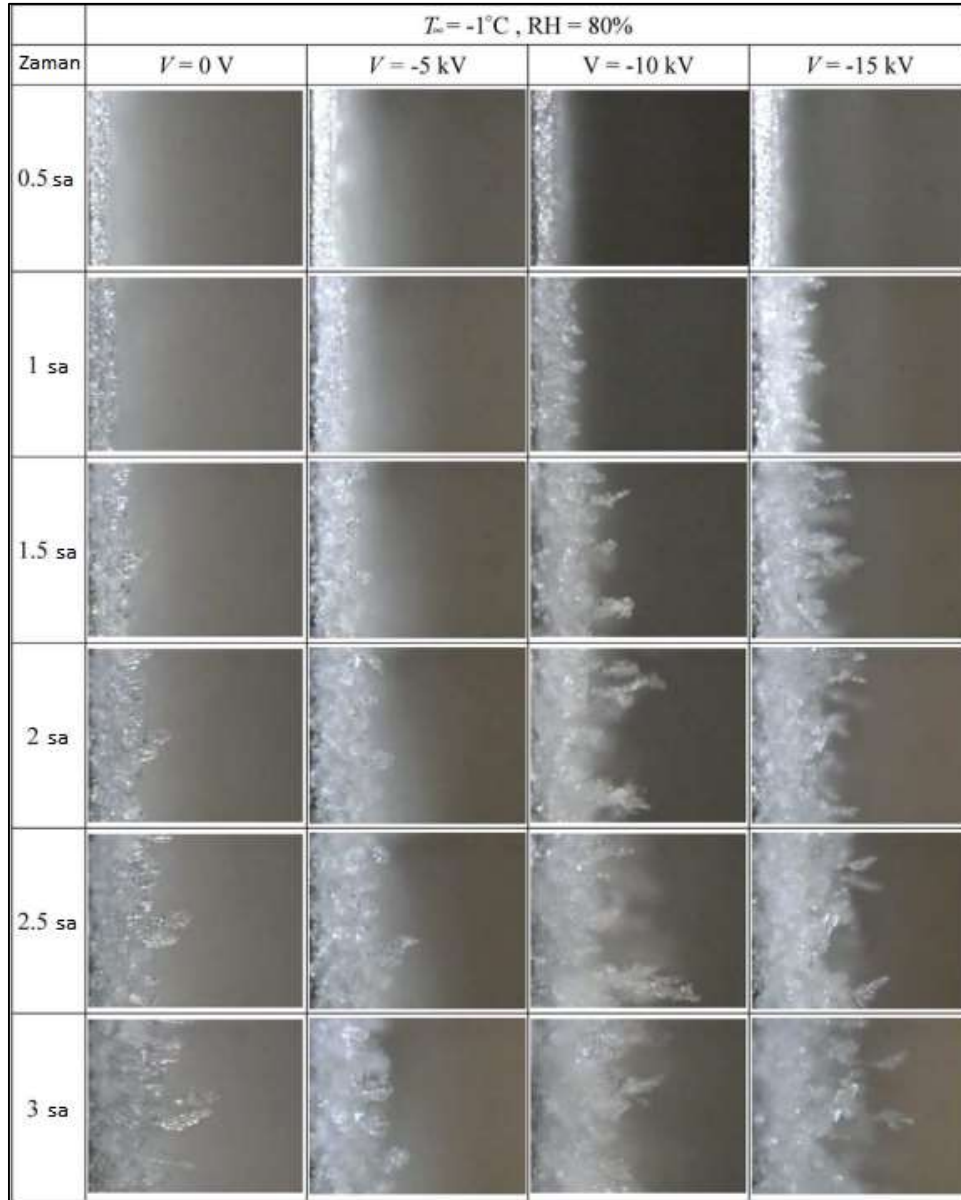
Elektro-hidrokinamik (EHD) metodu

Elektro-Hidrokinamik metot buzlanmanın önlenmesi amacıyla elektromanyetik alan yaratılarak hava üzerinde iyonize bir etki yaratmak şeklinde tanımlanabilir. Bu metot iyonlaşma etkisi ile hava tanecikleri içerisinde bulunan su taneciklerinin dağılımlarının

düzensiz olmasını sağlamaktadır. Bu uygulamanın elektronik sistemler için kullanılmasının yanında, defrost işlemleri için kullanılabileceği ilk olarak Schaefer tarafından yazılan çalışmada belirtilmiştir [39]. Schaefer yapmış olduğu çalışmasında elektromanyetik alan uygulanan hava üzerindeki su taneciklerinin dağılımlarının düzensiz olması sebebiyle, soğuk yüzey üzerinde kırılğan yapıya sahip buz kütleleri oluşturduklarını tespit etmiştir. Bu buzlanma yapısı sistem üzerinden buzun elimine edilmesi esnasında daha az enerji sarf edileceği şeklinde yorumlanmıştır.

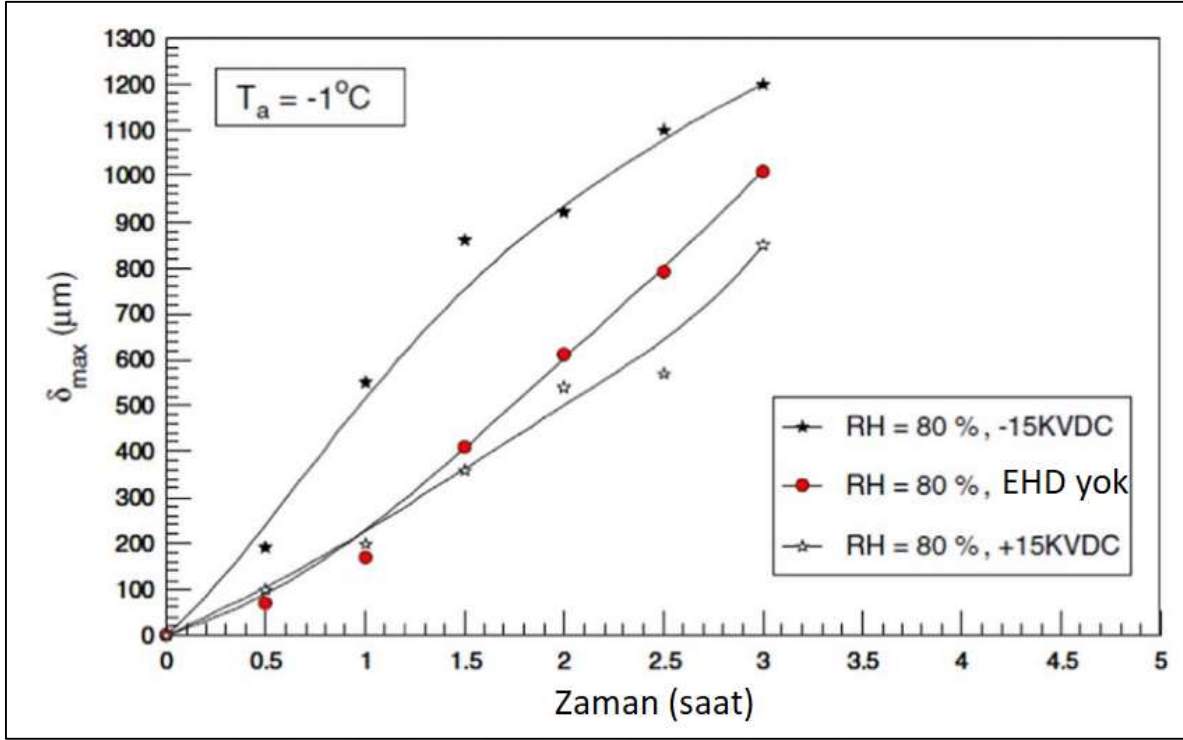
Molki ve diğerleri (2000) tarafından yapılan bir başka çalışmada; Doğal konveksiyon ile çalışacak bir sistem üzerinde kesintisiz elektromanyetik alan oluşturularak, elektromanyetik dalgaların buzlanmayı geciktirme süresini analiz etmişlerdir. Burada elektromanyetik alan şiddeti değiştirilerek buzlanmanın 30 dakika ile 1 saat arasında bir zaman diliminde ertelenebildiğini gözlemlemişlerdir [40].

Wang ve diğerleri (2004) DC elektrik akımının doğal konveksiyon ile çalışan dikey kanatçıklı bir evaporatör üzerindeki buzlanma oluşumuna etkisini araştırmışlardır. Elektrik alan oluşturulmadan yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, su buharının taneciklerinin havanın bağıl nemi oranında küçük damlacıklar halinde evaporatör yüzeylerinde biriktiğini belirtmişlerdir. Yüzey sıcaklığı suyun donma noktasının altına geldiği durumlarda buz oluşumu meydana gelmiştir. Burada buz taneciklerinin ebatlarının havanın bağıl nemi ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Aynı sisteme elektrik alan oluşturulduğunda ise yüzey üzerinde toplanan damlacıkların elektriksel kutuplaşma etkisi ile daha kırılğan yapıda kümелendiğini gözlemlemişlerdir. Bu sebeple buzun yüzeyde tutunmasının zorlaştığı ve yer çekiminin etkisi ile buz kütlelerinin yüzeyden ayrıldıklarını belirtmişlerdir [41].



Şekil 4.6. Farklı gerilim değerlerine göre yüzeydeki buzlanma formasyonu [41]

Yüzeye uygulanan farklı gerilim değerlerine göre yüzeydeki buzlanmanın oluşum formasyonları Şekil 4.6 ile belirtilmiştir. Yüksek elektrik akımı uygulanan yüzeyde buz taneciklerinin dışa doğru daha çok yöneldiği görülmektedir. Oluşan yer çekimi etkisinin kutuplaşan buz taneciklerinin yüzeyden ayrılışını kolaylaştırdığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.



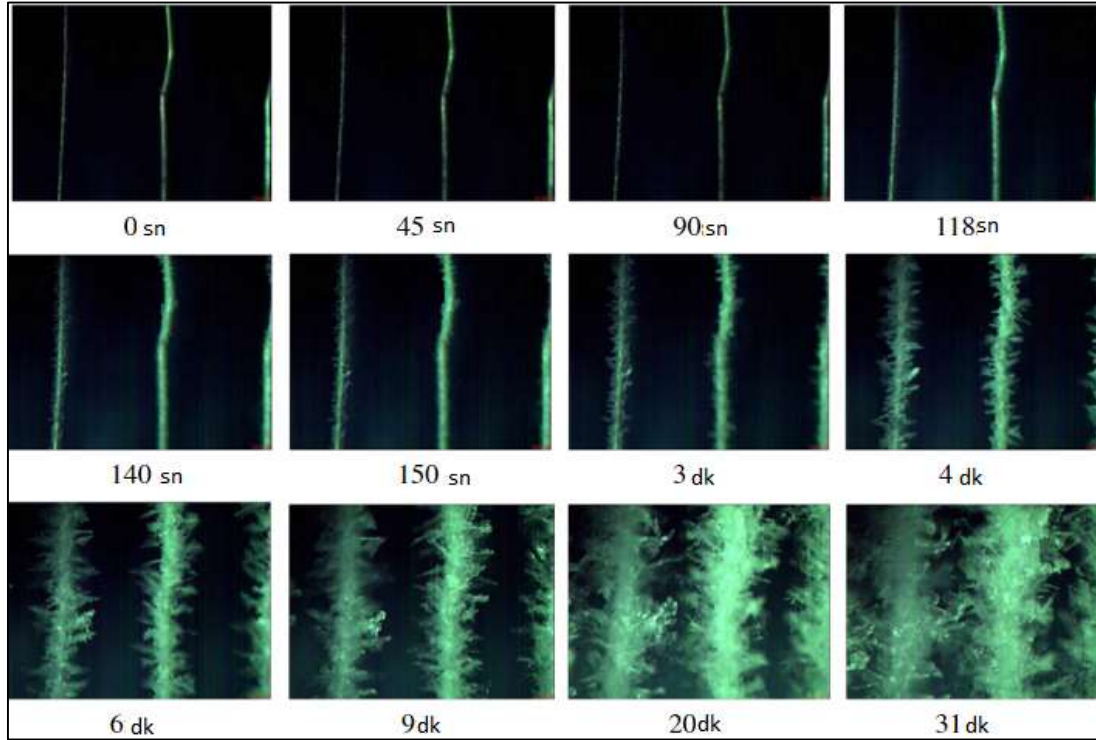
Şekil 4.7. Elektriksel kutuplaşmanın buz kalınlığı oluşumuna etkisinin belirtildiği grafik [41]

Salınım ve ultrasonik titreşim metodu

Aktif buz önleme metotlarından bir diğeri salınım ve ultrasonik titreşim metodudur. Bu yöntem yüzeye belli frekanslar uygulanarak yüzeyde oluşacak buzlanmanın geciktirilmesi prensibine dayanır.

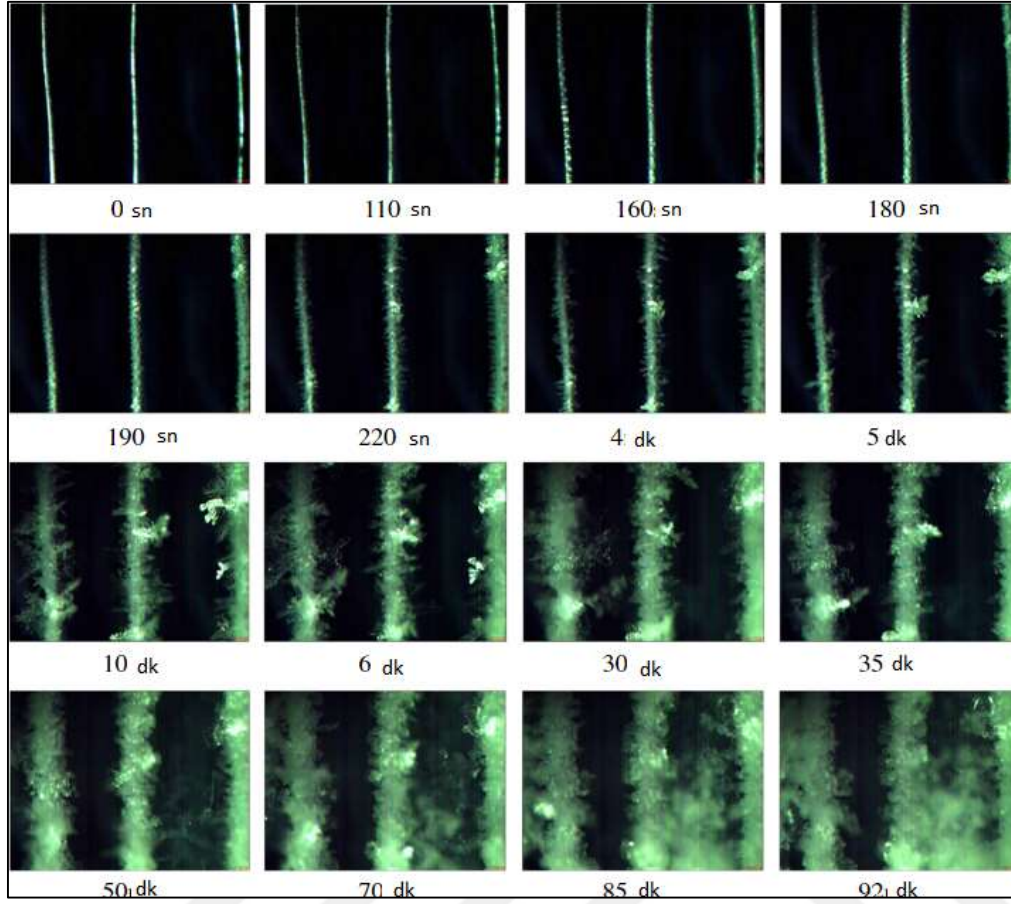
Cheng ve Shiu (2003) yürütmüş oldukları çalışmada, soğuk bir yüzeye elektromanyetik titreşim makinesi yardımıyla farklı genlik ($40 \leq D \leq 100$ mm) ve frekanslar ($100 \leq f \leq 200$ Hz) uygulayarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu frekans aralıkları normal olarak kabul edilmektedir. Deneyleri iki farklı başlangıç sıcaklığı ile gerçekleştirmişlerdir. İlk deneyde soğuk yüzey suyun buzlanma sıcaklığının çok altında bir sıcaklığa şartlandırılmıştır. Deney sonuçlarına göre titreşimin yüzeydeki buz oluşumunu olumsuz yönde etkilediği hatta buz formasyonunun daha yoğun ve kalın olduğunu belirtmişlerdir. İkinci deney çalışması ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup, ultrasonik titreşime maruz kalan plaka üzerindeki su damlacıklarının daha erken likit forma dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca damlacıkların boyutlarının da çok daha küçük ebatlarda olduğu belirtilmiştir. Damlacık tanesinin küçülmesi ve adetlerinin artması dolayısıyla ısı transferi hızlanmış ve buzlanmanın çözülme süresi kısaltılmıştır [42].

Wang ve diğerkleri (2014) Yüzeyine işlem uygulanan (Al kanatlar üzerine hidrofilik kaplama) alüminyum kanatçıklı evaporatör üzerinde titreşimin defrost üzerine etkisini araştırmak üzere deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada 60 W güce ve 28.2 kHz frekansa sahip titreşim modülü kullanılmıştır. Evaporatör üzerindeki kanatçık yüzeylerinin yaklaşık %66 oranında ultrasonik titreşim uygulanmadığında 32 dakika içerisinde buz ile kaplandığı görülmüştür. Buzlanma oluşumu Şekil 4.8 ile gösterilmiştir.

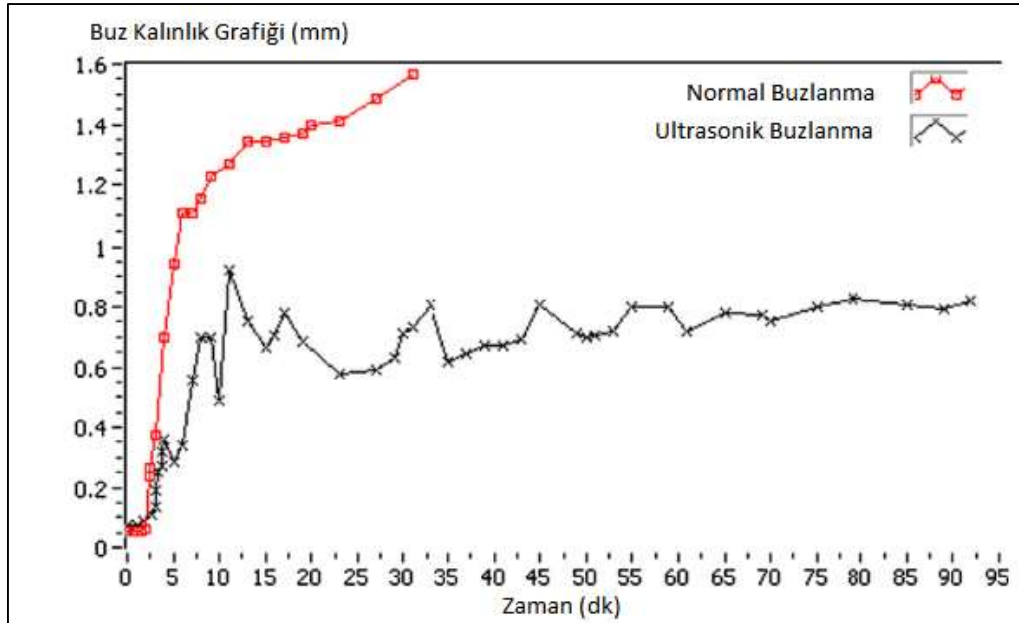


Şekil 4.8. Ultrasonik titreşim uygulanmadığı durumdaki buzlanma oluşumu [43]

Sonrasında ultrasonik titreşim başlatılarak buzlanma üzerindeki etki gözlenmiştir. Titreşim uygulandıktan sonraki oluşan buz formasyonu Şekil 4.9 ile belirtilmiştir.



Şekil 4.9. Ultrasonik titreşim uygulandığındaki buzlanma oluşumu [43]



Şekil 4.10. Titreşim uygulanan ve uygulanmayan durumlardaki buz kalınlıkları [43]

Titreşim uygulanan ve uygulanmayan durumlardaki buz kalınlıkları Şekil 4.10 ile verilen karşılaştırmalı grafik ile belirtilmiştir. Yüksek frekanslı titreşimlerin buzlanma kalınlığını azalttığı tespit edilmiştir [43].

4.1.3. Sistem defrost uygulamaları

Isı pompası sistemlerinin buz çözme uygulamalarında sistem seviyesinde üç temel metot karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki; sistemin normal operasyonu esnasında dış üniteye oluşan buzlanmanın giderilmesi amacıyla çalışan sistemin kapalı konuma geçmesi, buzun çözülmesinin beklenmesi ve sonrasında tekrar sistemin aktif konuma geçmesi şeklinde tanımlanan aç-kapa metodu olmaktadır. Bu sistemin avantajı basit ve maliyetsiz olmasıdır. Ancak sistem tamamen kapatıldığı için konfor sorunlarına sebep olmaktadır.

Bir diğer metot ise elektrikli rezistans kullanılarak dış üniteye oluşan buzun bertaraf edildiği uygulamalardır. Elektrikli rezistans dış üniteye evaporatör çevresine sarılarak, buzlanma meydana geldiğinde sistem tarafından güç verilerek buz eritilmektedir. Bu metodun uygulaması ve kurulması basittir ancak elektrikli rezistanslar buzun eritilmesi esnasında yüksek güç çektiklerinden dolayı, sistemin verimliliği düşmektedir.

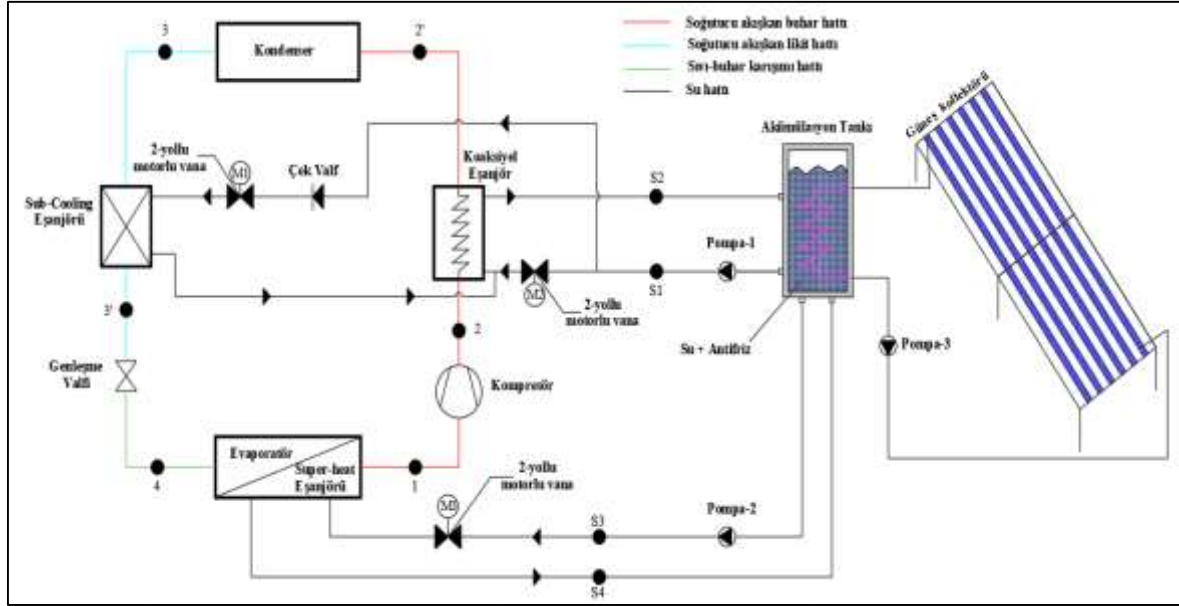
Üçüncü ve son metot ise sıcak gazın sistem içerisindeki motorlu vanalar yardımıyla ters akışta çevrilerek, evaporatör yüzeyindeki buzların eritilmesinin amaçlandığı sıcak gaz by-pass metodu olmaktadır. Bu uygulamada sistemde sıcak halde bulunan kompresör çıkışındaki sıcak gaz, motorlu vana ve by-pass şeklinde tasarlanan bakır boru hattı ile tekrardan dış ünite eşanjörüne gönderilmektedir. Bu sayede buzlanmanın çözülmesinin hızlandırılması amaçlanmaktadır. Bu sistem kurulum ve işletme maliyetleri açısından değerlendirildiğinde diğer sistemlere göre daha pahalı ve komplekstir. Ancak sistemin verimlilik katsayısı (COP) ve çalışma konforu düşünüldüğünde diğer sistemlere kıyasla daha iyi değerler sunmaktadır.

5. MATERYAL VE METOT

Soğuk iklim koşullarında çalışan hava kaynaklı ısı pompalarındaki en istenmeyen durumlardan bir tanesi ısı değiştiricilerin yüzeylerinin buzlanması ve böylelikle ısı transferinin düşmesidir. Bu hem sistemin verimliliğini düşürmekte ve böylelikle elektrik tüketim maliyetlerini artırmaktadır.

Yüzey buzlanmalarının çözümü için kullanılan yöntemler incelendiğinde farklı metotlar göze çarpmaktadır. Bu metotlar sistemdeki sıcak gazın kullanılması, elektrikli ısıtıcı eklenmesi ve az kullanılsa bile ısıtıcısız hava metotları olmaktadır. Sistemdeki gaz kullanıldığında, ısıtma işlemi kesintiye uğramakta ve konfor kaybına yol açmaktadır. Elektrikli ısıtıcı kullanılan sistemlerin ise enerji maliyetleri bir hayli yüksek çıkmakta, böylelikle işletme giderleri açısından büyük yük oluşturmaktadır. Sistemdeki soğutkanın yanma ve patlama riskinin bulunması durumunda zaten kullanım oranları oldukça düşmektedir.

Bu sistemler incelendiğinde hem enerji verimliliği yüksek olan hem de yeni bir bakış açısı ile sistemin tasarımını iyileştiren yeni bir metot kullanılması iyi bir alternatif olacaktır. Sisteme eklenecek sıcak su depolama tankı yardımıyla, sistemde geri kazanımı yapılabilecek enerjiler değerlendirilmiştir. Kompresör çıkışındaki gazın ısısı eşanjör yardımıyla tanka aktarılmış ve enerji geri kazanımı sağlanmıştır. Ayrıca aşırı soğutma eşanjörü yardımıyla yine bir miktar ısı tanka aktarılmış ve ayrıca sistemin aşırı soğutması sağlanarak verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Tasarlanan sistem Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Atık ısı geri kazanımına sahip ısı pompası sistemi

5.1. Yeni Tasarlanan Sistemin Termodinamik Analizi

Sistemin termodinamik analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir:

Çizelge 5.1. Sistemin termodinamik analizinde kullanılan parametreler

Parametre	Değer	Birim
Çevre Sıcaklığı, T_{∞}	0	°C
Buharlaşma Sıcaklığı, T_b	-10	°C
Yoğuşma Sıcaklığı, T_y	50	°C
Aşırı Kızdırma Sıcaklığı, T_{sh}	8	°C
Aşırı Soğutma Sıcaklığı, T_{sb}	8	°C
Buharlaşma Basıncı, P_b	3425	kPa
Yoğuşma Basıncı, P_y	17114	kPa
Soğutucu Akışkanın Kütlesel Debisi, $\dot{m}_r$	0,0151	kg/s
Soğutucu Akışkanın Özgül Isısı, c_{pr}	2,015	kJ/kgK
Kullanılan Soğutucu Akışkan	R290	-
Kompresör İzantropik Verimi	75	%
Sirkülasyon Pompası-1 Gücü, $\dot{W}_{p-1}$	0,10	kW
Sirkülasyon Pompası-2 Gücü, $\dot{W}_{p-2}$	0,10	kW
Sirkülasyon Pompası-2 Gücü, $\dot{W}_{p-3}$	0,05	kW
Sistem Eşanjörlerinin Verimi, e	85	%

Analizlerde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir [44,45].

Buharlaştırıcı, kompresör ve yoğuşturucu yükleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır. Denklemlerdeki entalpi değerlerine ait noktalar (1, 2, 2', 3, 3' ve 4) Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_r(h_1 - h_4) \quad (5.1)$$

$$\dot{W}_{\text{komp}} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (5.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{kond}} = \dot{m}_r(h_{2'} - h_3) \quad (5.3)$$

Çevrimdeki koaksiyel eşanjör ve sub-cooling eşanjör yükleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{\text{koaks}} = \dot{m}_r(h_{2'} - h_2) \quad (5.4)$$

$$\dot{Q}_{\text{sub}} = \dot{m}_r(h_{3'} - h_2) \quad (5.5)$$

Sistemin kütle değişimi aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistem}} \quad (5.6)$$

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} = \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} \quad (5.7)$$

Sistemin zamana bağlı enerji değişimi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır [44,45].

$$\sum \dot{E}_{\text{giren}} - \sum \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0 \quad (5.8)$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (5.9)$$

Sistem elemanlarının enerji denkliklerini hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$\dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{Q}_{\text{komp}} = \dot{Q}_{\text{kond}} + \dot{Q}_{\text{koaks}} + \dot{Q}_{\text{sub}} \quad (5.10)$$

Isı pompasının soğutma tesir katsayısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{STK} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{\text{komp}}} \quad (5.11)$$

Elektrikli ısıtıcı kullanılan sistem ve sıcak gaz defrost uygulaması kullanılan sistemlerin verimlilikleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır: [46].

$$\eta_{d,rezistanslı} = \frac{Q_{eriyen}}{Q_{rezistans}} \quad (5.12)$$

$$\eta_{d,hotgas} = \frac{Q_{eriyen}}{Q_{hotgas}} \quad (5.13)$$

Q_{eriyen} ifadesi buzu eritmek için gereken ısı enerjisini belirtirken, $Q_{rezistans}$ ve Q_{hotgas} sırasıyla elektrik rezistanslı ve hotgas defrost yönteminde tüketilen enerjinin hesabı aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanır [46].

$$Q_{eriyen} = m_{buz} * L_E \quad (5.14)$$

$$Q_{rezistans} = \dot{W}_{rezistans} * t_{rezistans} \quad (5.15)$$

$$Q_{hotgas} = \dot{W}_{komp.} * t_{komp.,hotgas} \quad (5.16)$$

Sistemin iki farklı modda kullanılabilecektir. Bu modlar ısıtma modu ve buz çözme modu olarak belirtilebilir. Isıtma modunda; sistem normal çevrimini tamamlayarak konfor alanında belirtilen sıcaklık değerini yakalamak için çalışacaktır. Çalışma devam ederken dış üniteye buzlanma oluşması durumunda diğer mod aktif olacaktır. Defrost modu olarak belirtilen bu metotta ise sistem çalışırken geri kazanım olarak tankta depolanan ısının evaporatör yüzeylerindeki buzu çözmesi için tanktaki sıcak suyun sirküle ettirilmesi olarak belirtilebilir. Sirküle eden sıcak su evaporatör yüzeylerindeki buzlanmanın çözülmesine yardımcı olacaktır.

5.1.1. Isıtma modu

Isıtma modunda; sistem normal çevrimini tamamlayarak konfor alanında belirtilen sıcaklık değerini yakalamak için çalışacaktır. Isıtma modu sistemdeki gerekliliğe göre üç farklı şekilde çalıştırılabilecektir.

Mod-1 (M1 motorlu vanası açık konumda, M2 ve M3 kapalı konumda-(Şekil 5.1))

Birini senaryoda dış rezerv tank içerisindeki suyun 0 °C olduğu durumda M1 motorlu vanası açık konumda tanktaki rezerv su sub-cooling eşanjöründe sirküle ettirilerek yoğunlaştırucudan çıkan gazın 8 °C daha soğutulması sağlanacaktır. Bu aşamada M2 vanası kapalı konumda olacaktır. M3 vanası ise oransal olarak açılıp

kapanabilecektir. Burada modda hem sistemde aşırı soğutma yapılması sağlanmış hem de dış tanka enerji depolanması sağlanmış olacaktır.

Mod-2 (M2 motorlu vanası açık konumda, M1 ve M3 kapalı konumda-(Şekil 5.1))

İkinci senaryo tank içerisindeki suyun sıcaklığının kondenser sıcaklığı üzerine çıkmaya başlaması durumunda uygulanacaktır. Bu durumda M1 motorlu vanası kapalı konumda olacaktır. Bu modda sistemdeki M2 vanası açık konuma getirilerek, kompresör çıkışındaki sıcak gazın ısısının koaksiyel eşanjör yardımıyla tanka depolanması sağlanacaktır. İkinci modda M3 vanası aynı birinci modda olduğu gibi oransal çalışacaktır.

Mod-3 (M2 ve M3 motorlu vanası açık konumda, M1 konumda-(Şekil 5.1))

Bu mod sistemde aşırı kızdırma yapılarak sistemin verimliliğinin artırılması şeklinde uygulanacaktır. Bu çalışma modunda M2 ve M3 vanaları açık olacaktır. Sistemdeki su pompalar yardımıyla (Pompa-1 ve Pompa-2) sirküle edecektir.

5.1.2. Defrost modu

Bu çalışma modunda evaporatör yüzeylerinde oluşan buzlanmanın giderilmesi amaçlanmıştır. Sistemdeki geri kazanılan enerjinin depolandığı tanktaki suyun sıcaklığı M3 vanası açık konuma getirilerek pompa yardımıyla çift sıralı eşanjörün hava giriş kısmındaki borularda döndürülecektir. Bu eşanjörün yapısı çift sıralı boru şeklinde olacaktır. Sistemin iç borulamada R290 soğutucu akışkanı, dış borulamada ise tanktaki antifrizli su dolaşacaktır. Buzlanma tamamen çözüldüğünde sistem yukarıda belirtilen ısıtma modlarından uygun olana göre otomasyon sistemi yardımıyla çalıştırılacaktır.



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, R290 propan gazı kullanılan ve 4,32 kW yoğuşturucu kapasitesine sahip kesintisiz ısıtma modunda çalışabilen ve enerji geri kazanımı yüksek, verimli bir sistemin analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji geri kazanımının yapılabilmesi için aşırı soğutma eşanjörü ve çift sıralı (koaksiyel) eşanjör kullanılmıştır. Sıcak su depolama tankı sisteme eklenmiştir.

Sistem elemanlarının termodinamik analizlere göre elde edilen değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Tasarlanan yeni sistemin ısıtma etkinlik katsayısı 2,75 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Analiz sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Evaporatör Çıkış Entalpisi, h_1	563,04	kJ/kg
Aşırı Kızdırma Entalpisi, h_1'	577,19	kJ/kg
Kompresör Çıkış Entalpisi, h_2	681,12	kJ/kg
Koaksiyel Eşanjör Çıkış Entalpisi, h_2'	620,53	kJ/kg
Kondenser Çıkış Entalpisi, h_3	334,38	kJ/kg
Sub-cooling Çıkış Entalpisi, h_3'	310,50	kJ/kg
Buharlaştırıcıdan Çekilen Isı, $\dot{Q}_e$	3,81	kW
Yoğuşturucuda Atılan Isı, $\dot{Q}_{kond}$	4,32	kW
Kompresör Gücü, $\dot{W}_{komp.}$	1,57	kW
Koaksiyel Eşanjöründe Kazanılan Enerji, $\dot{Q}_{koaks}$	0,91	kW
Sub-Cooling Eşanjöründe Kazanılan Enerji, $\dot{Q}_{sub}$	0,36	kW
Isı Pompası Etkinlik Katsayısı, COP_{hp}	2,75	-
Defrost Isısı İçin Harcanan Güç,	0,33	kW
Sistem Eşanjörlerinin Verimi	85	%

Yeni tasarlanan sistemin ekonomik analizleri bu tez çalışması kapsamında yapılmıştır. Maliyet analizi yapılırken; sistemin yılda 6 aylık sezon boyunca günde ortalama 2 saat defrost yaptığı kabul edilmiştir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Isı pompası günümüzde iklimlendirme ve endüstriyel ihtiyaçlarımız için kullandığımız, enerji verimliliği yüksek cihazların başında gelmektedir. Bu cihazların soğuk iklim koşullarında kullanımı aşamasında verimlilik kaybına yol açan, enerji ve para sarfiyatına sebep olan buzlanma problemi bu tez çalışması ile birlikte detaylı olarak incelenmiş ve yenilikçi bir tasarım geliştirilmiştir.

Yeni tasarımı yapılan ısı pompasına geri kazanım ekipmanları ve depolama tankı eklenerek, dışarıdan enerji girdisi olmadan ve konfor eksikliği yaşatmadan cihazın defrost prosesini gerçekleştirmesi amaçlanmıştır. Defrost için sistem iç enerjisinden yararlandığından dolayı, elektrikli rezistans kullanılan ısı pompası sistemi ile karşılaştırıldığında %63,6 daha verimli olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.1. Maliyet Tablosu

Tasarım Açıklaması	Toplam Maliyet
Geleneksel R290 Soğutucu Akışkanlı Isı Pompası (4,32 kW-COP:2,75)	50.000 TL
Yeni Tasarımı Yapılan R290 Soğutucu Akışkanlı Isı Pompası (4,32 kW-COP:2,75)	56.000 TL

Sistemin aynı kapasiteye sahip elektrikli rezistans ile çalışan bir sistem ile karşılaştırmalı maliyet bilgileri Çizelge 7.1 ile gösterilmiştir. İki sistemin karşılaştırmalı maliyet analizi yapılarak geri ödeme süresi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{6.000 \text{ TL}}{1400 \text{ TL}} = 4,28 \text{ Yıl}$$

Buna göre yapılan hesaplamalarda yeni tasarlanan sistemin geri ödeme süresinin 4,28 Yıl (Yaklaşık 52 Ay) gibi bir süre olduğu görülmüştür. Atık ısı geri kazanım metodu uygulanarak tasarlanan yeni sistem; hem literatüre yeni bir tasarım çalışması kazandırmış hem de problemin çözümünün ekonomik bir metodunu ortaya koymuştur.

Dünyamızda artan karbon salınımı ve çevre kirliliği göz önüne alındığında, tasarlanan sistem ilerleyen yıllarda yapılacak ekipman tasarımlarına yenilikçi bir bakış açısı kazandırması açısından büyük öneme sahiptir. Bu sistem; doğal soğutucu akışkan kullanılan sistemlerin verimli ve sürdürülebilir olması açısından örnek teşkil etmektedir. İlerleyen süreçlerde sistemin yenilenebilir teknolojiler ile desteklenerek verimliliği artırılabilir.



KAYNAKLAR

1. James H., Makiko S., Reto R., Ken L., David W. L., Martin M., (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 103(39), 14288-14293.
2. Gagneja, A., and Pundhir, S. (2016). Heat pumps and its applications. *International Journal of Advances in Chemical Engineering and Biological Sciences*, 3(1), 117-120.
3. Velders, G. J., Andersen, S. O., Daniel, J. S., Fahey, D. W., and McFarland, M. (2007). The importance of the Montreal Protocol in protecting climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(12), 4814-4819.
4. Böhringer, C. (2003). The Kyoto protocol: a review and perspectives. *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 451-466.
5. İnternet: Regulation (EC) No. 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases. (2006). *Official Journal of European Union*, L 161/1. Web: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/842/oj/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
6. İnternet: Regulation (EC) No 2037/2000 of the European Parliament and of the Council of 29 June 2000 on substances that deplete the ozone layer. (2000). *Official Journal of European Union*, L 244. Web: <http://data.europa.eu/eli/reg/2000/2037/oj/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
7. İnternet: Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance. (2014). *Official Journal of European Union*, L 150/195. Web: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
8. Song, M., Deng, S., Dang, C., Mao, N., and Wang, Z. (2018). Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting. *Applied Energy*, 211, 1150-1170.
9. Park, K. J., and Jung, D. (2007). Thermodynamic performance of R502 alternative refrigerant mixtures for low temperature and transport applications. *Energy Conversion and Management*, 48(12), 3084-3089.
10. Shen, J., Qian, Z., Xing, Z., Yu, Y., and Ge, M. (2019). A review of the defrosting methods of air source heat pumps using heat exchanger with phase change material. *Energy Procedia*, 160, 491-498.
11. Moallem, E., Hong, T., Cremaschi, L., and Fisher, D. E. (2013). Effects of surface coating and water retention on frost formation in microchannel evaporators (ASHRAE RP-1589). *Hvac&R Research*, 19(4), 347-362.

12. Erten, S. ve Uludağ, K. (2019). Soğutma sistemlerinde R404a ve R290 soğutucu akışkan kullanımının termodinamik analizi: Deneysel karşılaştırma. R. Karapınar ve A. Güler (Edt.), *VII. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu Bildiriler Kitabı* içinde. Elazığ: Asos Yayınevi, 254-267.
13. Arslan, E., Kosan, M., Aktas, M., ve Erten, S. (2021). Experimental assessment of comparative R290vs. R449a refrigerants by using 3E (energy, exergy and environment) analysis: A supermarket application. *Journal of Thermal Engineering*, 7(3), 595-607.
14. Ji, J., Pei, G., Chow, T. T., Liu, K., He, H., Lu, J., and Han, C. (2008). Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *Solar Energy*, 82(1), 43-52.
15. Şevik, S., Doğan, H., ve Aktaş, M. (2011). Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli ısıtma-kurutma sisteminin modellenmesi. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 85-91.
16. Kim, T., Choi, B. I., Han, Y. S., and Do, K. H. (2018). A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system. *Energy Conversion and Management*, 172, 472-484.
17. Banjac, M. (2015). Achieving sustainable work of the heat pump with the support of an underground water tank and solar collectors. *Energy and Buildings*, 98, 19-26.
18. Atmaca, I., ve Kocak, S. (2014). Theoretical energy and exergy analyses of solar assisted heat pump space heating system. *Thermal Science*, 18(2), 417-427.
19. Huang, D., Ri-Jing, Z., Liu, Y., and Yi, D. B. (2014). Effect of fin types of outdoor fan-supplied finned-tube heat exchanger on periodic frosting and defrosting performance of a residential air-source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 69(1-2), 251-260.
20. Liu, Z., Wang, H., Zhang, X., Meng, S., and Ma, C. (2006). An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 229-236.
21. Hoffenbecker, N., Klein, S. A., and Reindl, D. T. (2005). Hot gas defrost model development and validation. *International Journal of Refrigeration*, 28(4), 605-615.
22. Hu, B., Wang, X., Cao, F., He, Z., and Xing, Z. (2014). Experimental analysis of an air-source transcritical CO₂ heat pump water heater using the hot gas bypass defrosting method. *Applied Thermal Engineering*, 71(1), 528-535.
23. Zhang, W., Yang, Z., Zhang, X., Lv, D., and Jiang, N. (2016). Experimental research on the explosion characteristics in the indoor and outdoor units of a split air conditioner using the R290 refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 67, 408-417.
24. Li, T. (2014). Indoor leakage test for safety of R-290 split type room air conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 40, 380-389.

25. Tang, W., He, G., Zhou, S., Sun, W., Cai, D., and Mei, K. (2018). The performance and risk assessment of R290 in a 13 kW air source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 144, 392-402.
26. Jierong, L., & Tingxun, L. (2018). Detailed dynamic refrigerant migration characteristics in room air-conditioner with R290. *International Journal of Refrigeration*, 88, 108-116.
27. Qu, M., Li, T., Deng, S., Fan, Y., and Li, Z. (2017). Improving defrosting performance of cascade air source heat pump using thermal energy storage based reverse cycle defrosting method. *Applied Thermal Engineering*, 121, 728-736.
28. Ozsipahi, M., Kose, H. A., Kerpicci, H., ve Gunes, H. (2022). Experimental study of R290/R600a mixtures in vapor compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 133, 247-258.
29. İnternet: Learn Metrics. (2022). Air-source heat pumps disadvantages: 8 cons revealed (UK edition). Web: <https://learnmetrics.com/disadvantages-of-air-source-heat-pumps/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
30. İnternet: Renewables First. (2022). Heat pump introduction. Web: <https://www.renewablesfirst.co.uk/water-source-heat-pumps/free-heat-pump-initial-assessment/attachment/heat-pump/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
31. İnternet: tekWorx. (2022). How to utilize ground source heat pump systems for increased energy efficiency. Web: <https://www.tekworx.us/blog/ground-source-heat-pump-systems-and-efficiency/>, Son Erişim Tarihi: 22.03.2022.
32. Lazzarin, R. (2020). Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *International Journal of Refrigeration*, 116, 146-160.
33. Ameen, F. R., Coney, J. E. R., and Sheppard, C. G. W. (1993). Experimental study of warm-air defrosting of heat-pump evaporators. *International Journal of Refrigeration*, 16(1), 13-18.
34. Li, D., and Chen, Z. (2014). Experimental study on instantaneously shedding frozen water droplets from cold vertical surface by ultrasonic vibration. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53, 17-25.
35. Rahman, M. A., and Jacobi, A. M. (2012). Drainage of frost melt water from vertical brass surfaces with parallel microgrooves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(5-6), 1596-1605.
36. Rahman, M. A., and Jacobi, A. M. (2014). Experimental study on frosting/defrosting characteristics of microgrooved metal surfaces. *International Journal of Refrigeration*, 50, 44-56.
37. Rahman, M. A., and Jacobi, A. M. (2015). Study of frost properties and frost melt water drainage on microgrooved brass surfaces in multiple frost/defrost/refrost cycles. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 453-461.

38. Liu, Z., Wang, H., Zhang, X., Meng, S., and Ma, C. (2006). An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 229-236.
39. Schaefer, V. J. (1950). *Project cirrus, final report, general electric research laboratory*. New York: Schenectady, 50.
40. Molki, M., Ohadi, M. M., and Bloshteyn, M. (2000). *Frost reduction under intermittent electric field*. Proceedings of the 2000 National Heat Transfer Conference: Presented at the 2000 National Heat Transfer Conference (NHTC2000), August 20-22, Pittsburgh, Pennsylvania.
41. Wang, C. C., Huang, R. T., Sheu, W. J., and Chang, Y. J. (2004). Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(14-16), 3491-3505.
42. Cheng, C. H., and Shiu, C. C. (2003). Oscillation effects on frost formation and liquid droplet solidification on a cold plate in atmospheric air flow. *International Journal of Refrigeration*, 26(1), 69-78.
43. Wang, D., Tao, T., Xu, G., Luo, A., and Kang, S. (2014). Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 1-11.
44. Çengel, Y. A., ve Boles, M. A. (2008). *Termodinamik, mühendislik yaklaşımıyla*. (Beşinci Baskı). İzmir: Güven Kitabevi, 946.
45. Hepbasli, A., ve Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229.
46. Liang, J., Sun, L., and Li, T. (2018). A novel defrosting method in gasoline vapor recovery application. *Energy*, 163, 751-765.



Gazili olmak ayrıcalıktır...