



ATIK ISI KAYNAKLI ENDÜSTRİYEL ISI POMPALARININ TERMODİNAMİK ANALİZİ

*Sinem SEZGİN¹, Reşat SELBAŞ²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği
Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Isparta,
Türkiye

(Geliş/Received: 18.02.2026, Kabul/Accepted: 15.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Endüstriyel tesislerde açığa çıkan atık ısının geri kazanılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel bir tesiste oluşan düşük sıcaklıktaki atık ısının kaynak olarak kullanıldığı tek kademeli buhar sıkıştırma bir ısı pompası sisteminin teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Sistem, bir fabrikanın idari birimlerinin 55–58 °C sıcak su ile ısıtılması amacıyla modellenmiş ve 30 °C atık ısı kaynağı için simüle edilmiştir. Sistem bileşenleri için kütle, enerji ve ekserji denklemleri yazılmış ve farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıkları için sistem performansı enerji ve ekserji analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca R1234ze(Z), R245fa, R1233zd(E) ve R123 soğutucu akışkanlarının termodinamik ve ekserji performansları çevresel ve güvenlik özellikleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre en yüksek COP değeri 4.52 ile R1234ze(Z) akışkanı için elde edilmiş, bunu 4.48 COP değeri ile R1233zd(E) takip etmiştir. R123 ve R245fa akışkanları için COP değerleri sırasıyla 4.24 ve 4.14 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Atık ısı geri kazanımı, Enerji analizi, Ekserji analizi, Düşük GWP, R1234ze(Z), R1233zd(E)

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF WASTE HEAT SOURCE INDUSTRIAL HEAT PUMPS

ABSTRACT

Waste heat recovery in industrial facilities is of great importance for improving energy efficiency and reducing environmental impacts. In this study, a theoretical analysis of a single-stage vapor compression heat pump system using low-temperature industrial waste heat as the heat source was conducted. The system was modeled to provide hot water at 55–58 °C for heating the administrative units of a factory and was simulated for a 30 °C waste heat source. Mass, energy, and exergy balance equations were formulated for the system components, and the system performance was evaluated for different evaporator and condenser temperatures using energy and exergy analysis methods. Furthermore, the thermodynamic and exergy performances of R1234ze(Z), R245fa, R1233zd(E), and R123 refrigerants were compared by considering their environmental and safety characteristics. The results showed that the highest COP value of 4.52 was obtained for R1234ze(Z), followed by R1233zd(E) with a COP of 4.48. The COP values for R123 and R245fa were calculated as 4.24 and 4.14, respectively.

Keywords: Waste heat recovery, Energy analysis, Exergy analysis, Low GWP, R1234ze(Z), R1233zd(E)

1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel enerji tüketiminin büyük bir bölümü ısı üretimi amacıyla gerçekleşmekte ve bu süreçlerin sonunda farklı sıcaklık seviyelerinde atık ısı oluşmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynakları çoğu işletmede doğrudan atmosfere veya soğutma suyu devrelerine atılmakta, bu nedenle hem kullanılabilir enerji potansiyeli kaybedilmekte hem de proseslerin dolaylı karbon ayak izi artmaktadır. Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bu ısı potansiyeli daha yüksek sıcaklık seviyesine taşıyabildikleri için endüstriyel ısı geri kazanımı ve elektrifikasyon stratejileri içinde giderek daha güçlü bir konum kazanmaktadır [1,2].

Yüksek sıcaklıklı ve endüstriyel ısı pompaları üzerine güncel literatür, teknolojinin yalnızca bina ısıtmasıyla sınırlı olmadığını; gıda, tekstil, kimya, kurutma, yıkama, bölgesel ısıtma ve proses sıcak suyu üretimi gibi alanlarda da fosil yakıtlı kazanların yükünü azaltabilecek bir çözüm sunduğunu göstermektedir [1-3]. Özellikle ısı kaynağı sıcaklığının 20-80 °C, ısı yutak sıcaklığının ise 50-120 °C aralığında olduğu uygulamalarda buhar sıkıştırma çevrimler hem enerji verimliliği hem de işletme basitliği bakımından öne çıkmaktadır.

Soğutucu akışkan seçimi, endüstriyel ısı pompalarının performansını belirleyen ana tasarım değişkenlerinden biridir. R245fa ve R123 gibi geleneksel akışkanlar yüksek sıcaklık uygulamalarında uzun süre kullanılmış olmakla birlikte, yüksek GWP, ODP veya toksisite kaygıları nedeniyle yeni nesil düşük GWP'li HFO ve HCFO akışkanlara doğru belirgin bir geçiş vardır [2,4]. R1234ze(Z) ve R1233zd(E), düşük GWP değerleri, sıfır veya ihmal edilebilir ozon etkileri ve yüksek sıcaklık ısı pompası çevrimlerinde rekabetçi termodinamik özellikleri nedeniyle literatürde öne çıkan adaylar arasındadır [4-7].

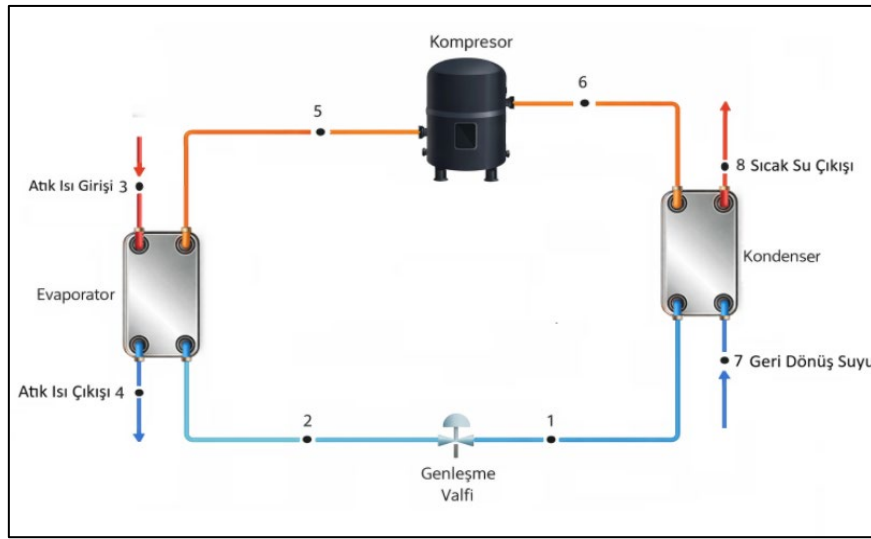
Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, yüksek sıcaklıklı endüstriyel ısı pompalarının atık ısı geri kazanımı ve enerji verimliliği açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Jouhara vd. [10], HTHP sistemlerinin endüstriyel elektrifikasyon ve atık ısı geri kazanımındaki rolünü vurgulamış olup, bu çalışmada düşük sıcaklıklı atık ısının 55–58 °C sıcak su üretiminde değerlendirilmesiyle benzer bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Arpagaus vd. [11], akışkan seçiminde sıcaklık kaldırımı ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiş, bu çalışmada da R1234ze(Z) ve R1233zd(E) gibi düşük GWP'li akışkanların enerji ve ekserji performansları karşılaştırılmıştır. Mateu-Royo vd. [12], yüksek sıcaklık kaldırımalarında gelişmiş çevrimlerin avantaj sağladığını ifade ederken, bu çalışmada kullanılan daha düşük sıcaklık kaldırımı için tek kademeli çevrimin yeterli performans sunduğu görülmüştür. Fukuda vd. [13] tarafından R1234ze(Z)'nin yüksek sıcaklık uygulamalarında güçlü bir aday olduğu belirtilmiş olup, mevcut çalışmada da aynı akışkan en yüksek COP ve ekserji verimini sağlayarak literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir. Kondou ve Koyama [14], çok kademeli çevrimlerin yüksek sıcaklık kaldırımalarında avantaj sağladığını belirtirken, bu çalışmada daha sınırlı sıcaklık farkı sayesinde tek kademeli çevrimle yüksek performans elde edilmiştir. Ayrıca Arpagaus ve Bertsch [15] tarafından bildirilen COP değerlerine kıyasla bu çalışmada daha yüksek COP elde edilmesi, yutak sıcaklığının 55–58 °C gibi daha düşük seviyelerde tutulmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma literatürde önerilen düşük GWP'li akışkanların endüstriyel atık ısı geri kazanım uygulamalarında etkin şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklı atık ısının bir fabrikanın idari katını ısıtma amaçlı değerlendirilmesine yönelik teorik bir buhar sıkıştırma ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde amaç, 30 °C seviyesindeki geri dönüş suyu kaynaklı atık ısının, sıcak su temelli bir ısıtma sisteminde kullanılabilecek sıcaklık seviyesine yükseltilmesidir. Bu doğrultuda, kondenser çıkışında elde edilmek istenen kullanım sıcak suyu sıcaklığı 55-58 °C aralığında hedeflenmiştir. Hesaplamalarda çevre koşulu $T_0 = 298.15$ K ve $P_0 = 101.325$ kPa kabul edilmiştir.

2.1. Sistem tanımı (System description)

Sistem bileşenleri kompresör, kondenser, genişleme vanası ve evaporatördür. Atık ısı kaynağı evaporatörde buharlaşma için değerlendirilmiştir. Kondenserde ise ısıtma amaçlı gerekli ısı sağlanmıştır. Şekil 1.'de Atık ısı kaynaklı ısı pompası sisteminin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 1. Atık ısı kaynaklı ısı pompası sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of the waste heat source heat pump system)

Atık ısı kaynağı olarak kullanılan geri dönüş suyu, evaporatöre 3 noktasından 1000 kg/h debide, 30 °C sıcaklıkta ve 3 bar basınçta girmekte, ısı transferi sonrasında 4 noktasından daha düşük sıcaklıkta çıkmaktadır. Konut ısıtma devresindeki su ise kondensere 7 noktasından 1000 kg/h debide, 30 °C sıcaklıkta ve 3 bar basınçta girmekte, kondenser çıkışında 8 noktasından idari katın ısıtma ihtiyacını karşılayacak, istenen minimum 55 °C sıcaklık seviyesine ulaşmaktadır.

Atık ısı kaynaklı ısı pompasının enerji analizindeki kabuller şu şekildedir;

- Tüm süreçler kararlı hâl ve kararlı akış koşullarında gerçekleşmektedir.
- Sistem bileşenlerinde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Boru hatları, bağlantı elemanları ve ısı değiştirgeçlerinde basınç düşümleri ve çevreye olan ısı kayıpları göz ardı edilmiştir.
- Isı değiştirgeçlerinde akışkanlar arasında tam ısı transferi gerçekleştiği, yani eşanjör etkinliğinin ideal olduğu varsayılmıştır.
- Sistem içerisinde herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı varsayılmıştır.
- Çevrim elemanlarında zamanla oluşabilecek performans düşüşleri dikkate alınmamıştır.
- Atık ısı kaynağının sıcaklığı ve debisi simülasyon boyunca sabit kabul edilmiştir.

2.2. Termodinamik analiz (Thermodynamic analysis)

Her bir bileşen için kütle, enerji ve ekserji denklemleri aşağıdaki genel formda yazılmıştır. Tablo 1.'de Sistem elemanları denge denklemleri verilmiştir.

Tablo 1. Sistem elemanları denge denklemleri (Balance equations of system components)

Sistem Elamanı	Kütle	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Genleşme valfi	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_r$	$h_1 = h_2$	$\dot{E}x_c = \dot{m}_r(ex_1 - ex_2)$
Evaporatör	$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 = \dot{m}_r$; $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_w$	$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_r(h_5 - h_2)$; $\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_w C_{pw}(T_3 - T_4)$	$\dot{E}x_c = \dot{m}_r(ex_2 - ex_5) + \dot{m}_w(ex_3 - ex_4)$
Kompresör	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_r$	$\dot{m}_r h_5 + \dot{W}_c = \dot{m}_r h_6$; $\dot{W}_c = \dot{m}_r(h_6 - h_5)$	$\dot{E}x_c = \dot{W}_c + \dot{m}_r(ex_5 - ex_6)$
Kondenser	$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 = \dot{m}_r$	$\dot{m}_r h_6 = \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_{kon}$; $\dot{Q}_{kon} = \dot{m}_r(h_6 - h_1)$	$\dot{E}x_{kon} = \dot{m}_r(ex_6 - ex_1) + \dot{m}_w(ex_7 - ex_8)$

Ekserji verimi, bir sistemde verilen enerjinin ne kadarının yararlı işe veya yararlı etkiye dönüştürülebildiğini gösteren termodinamik performans göstergesidir. Başka bir ifadeyle, sistemin tersinmezliklerden ne ölçüde etkilendiğini ifade eder. Sistemin ekserji verimi;

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_8 - \dot{E}_7}{\dot{W}_{comp}} \quad (1)$$

Bu tanım, yalnızca ısı miktarını değil, üretilen sıcak suyun çevre koşullarına göre kullanılabilir iş potansiyelini dikkate aldığı için klasik COP değerini tamamlayıcı niteliktedir. COP formülü;

$$COP = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{comp}} \quad (2)$$

2.3. Sistemde kullanılan akışkanlar ve özellikleri (Refrigerants used in the system and their properties)

Isıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanının seçimi, sistemin termodinamik performansını direkt olarak etkilediği gibi, çevresel sürdürülebilirlik ve güvenlik açısından da kritik öneme sahiptir. Soğutucu akışkanların, ozon tabakasına zarar verme potansiyeli (ODP), küresel ısınma potansiyeli (GWP), toksik ve yanıcılıkları, çevresel etkileri ve kullanım güvenliği akışkan seçiminde ve kullanımında oldukça önemli parametrelerdir. Bu nedenle, alternatif akışkanların değerlendirilmesinde ve karşılaştırılmasında yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda çevre ve insan sağlığına olan etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmada kullanılan akışkanların özellikleri Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada karşılaştırılan soğutucu akışkanların çevresel ve güvenlik özellikleri
(Environmental and safety characteristics of the refrigerants compared in the study)

	R1234ze(Z)	R245fa	R1233zd(E)	R123
Güvenlik Sınıfı	A2L	B1	A1	B1
GWP	7	1030	4.5	77
ODP	0	0	0	0.02
Kritik Sıcaklığı	109.4 °C	153.9 °C	166.4 °C	183.7 °C
Kaynama Sıcaklığı	-18.97 °C	15.05 °C	18.26 °C	27.82 °C

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu çalışmada, düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynağı kullanılarak tasarlanan ısı pompası sisteminin termodinamik performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin düşük sıcaklık seviyesindeki atık ısıyı faydalı ısıya dönüştürebildiğini ve yüksek performans katsayıları (COP) sağladığını göstermektedir. Ayrıca seçilen çalışma akışkanının sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş ve çevresel açıdan daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip akışkanların rekabetçi performans sunduğu görülmüştür. Tablo 3.'te R1234ze(Z) soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R1234ze(Z) akışkanın debisi 464 kg/h'dır.

Tablo 3. R1234ze(Z) çalışma akışkanı analizi (Analysis of R1234ze(Z) refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R1234ze(Z)	244.0	35	4.5	1.150
2	R1234ze(Z)	244.0	0.59	0.7	1.160
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R1234ze(Z)	424.3	5	0.7	1.819
6	R1234ze(Z)	475.5	73.6	4.5	1.857
7	SU	126.0	30	3	0.436
8	SU	233.4	55.7	3	0.776

Tablo 3.'te verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R1234ze(Z) akışkanı için COP değeri 4.52 bulunmuştur.

Tablo 4.'te R245fa soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R245fa akışkanın debisi 517 kg/h'dır.

Tablo 4. R245fa çalışma akışkanı analizi (Analysis of R245fa refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R245fa	246.3	35	4.5	1.158
2	R245fa	246.3	-1.38	0.5	1.170
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R245fa	408.2	3.18	0.5	1.766
6	R245fa	459.7	69.34	4.5	1,804
7	SU	126.0	30	3	0,436
8	SU	236.3	56.4	3	0.785

Tablo 4.'te verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R245fa akışkanı için COP değeri 4.14 bulunmuştur.

Tablo 5.'de R1233zd(E) soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R1233zd(E) akışkanın debisi 505 kg/h'dır.

Tablo 5. R1233zd(E) çalışma akışkanı analizi (Analysis of R1233zd(E) refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R1233zd(E)	273.8	35	3.5	1.270
2	R1233zd(E)	273.8	0.8	0.5	1.279
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R1233zd(E)	439.5	5.7	0.5	1.884
6	R1233zd(E)	486.9	70.3	3.5	1.919
7	SU	126.0	30	3	0.436
8	SU	233.6	55.7	3	0.777

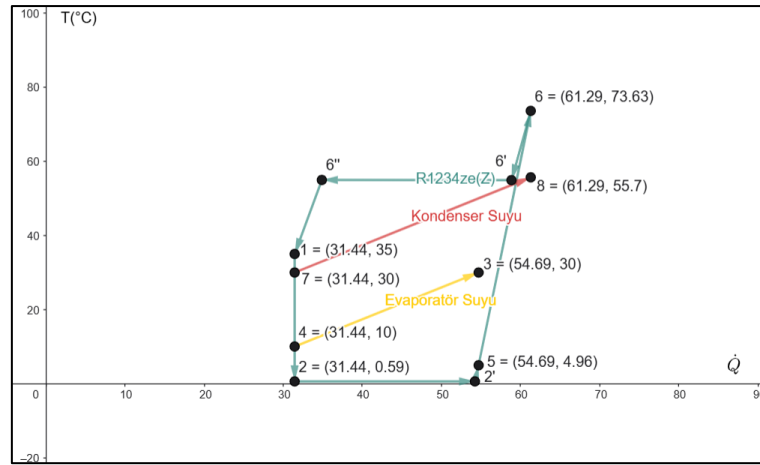
Tablo 5.'de verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R1233zd(E) akışkanı için COP değeri 4.48 bulunmuştur.

Tablo 6.'da R123 soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R123 akışkanın debisi 567 kg/h'dır.

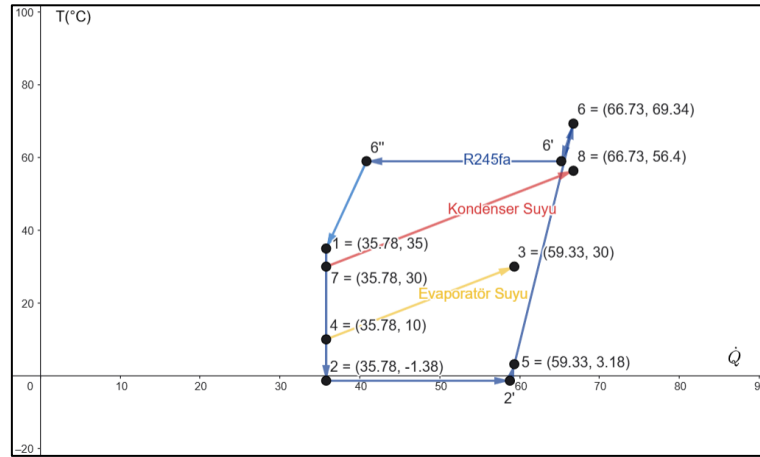
Tablo 6. R123 çalışma akışkanı analizi (Analysis of R123 refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R123	235.4	35	2.6	1.121
2	R123	235.4	-1.83	0.3	1.130
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R123	383.0	2.4	0.3	1.674
6	R123	428.4	73.7	2.6	1.708
7	SU	126	30	3	0.436
8	SU	235.4	56.2	3	0.782

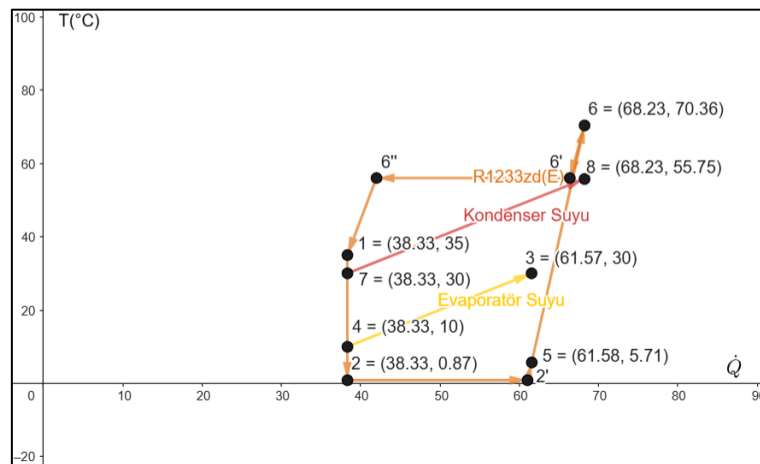
Tablo 6.'da verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R123 akışkanı için COP değeri 4.24 bulunmuştur. İncelenen soğutucu akışkanlar için sistem bileşenlerindeki ısı transfer süreçlerini görselleştirmek amacıyla sıcaklık–ısı transferi $T-\dot{Q}$ diyagramları sunulmuştur.



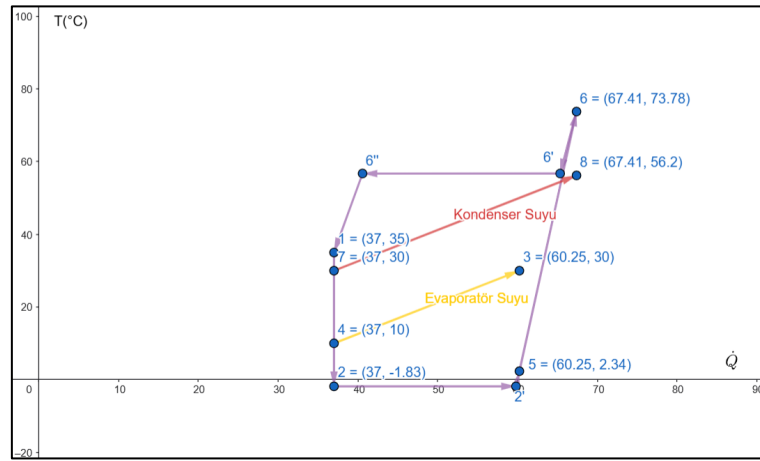
Şekil 2. R1234ze(Z) akışkanına ait $T-\dot{Q}$ grafiği ($T-\dot{Q}$ diagram of R1234ze(Z) refrigerant)



Şekil 3. R245fa akışkanına ait $T-\dot{Q}$ grafiği ($T-\dot{Q}$ diagram of R245fa refrigerant)

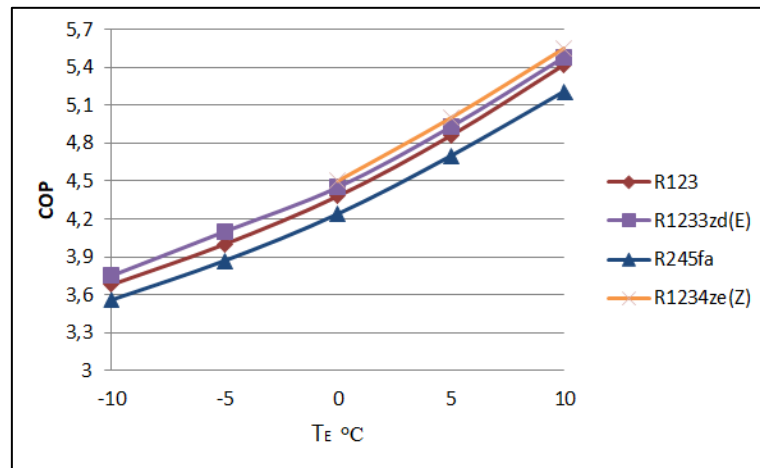


Şekil 4. R1233zd(E) akışkanına ait $T-\dot{Q}$ grafiği ($T-\dot{Q}$ diagram of R1233zd(E) refrigerant)

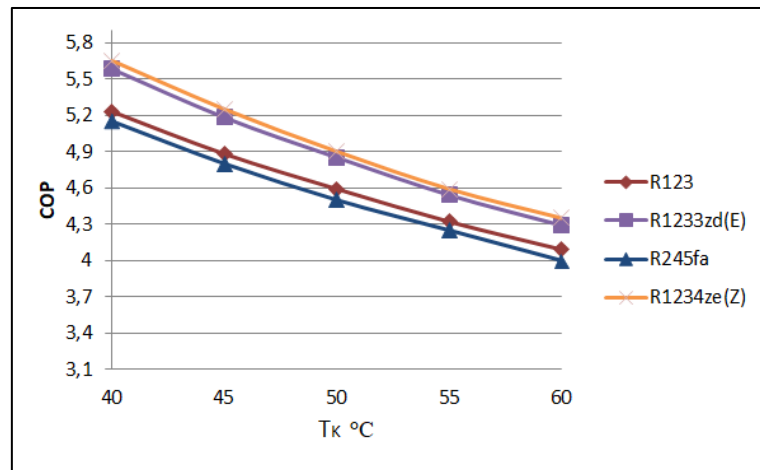


Şekil 5. R123 akışkanına ait T-Q grafiği (T-Q diagram of R123 refrigerant)

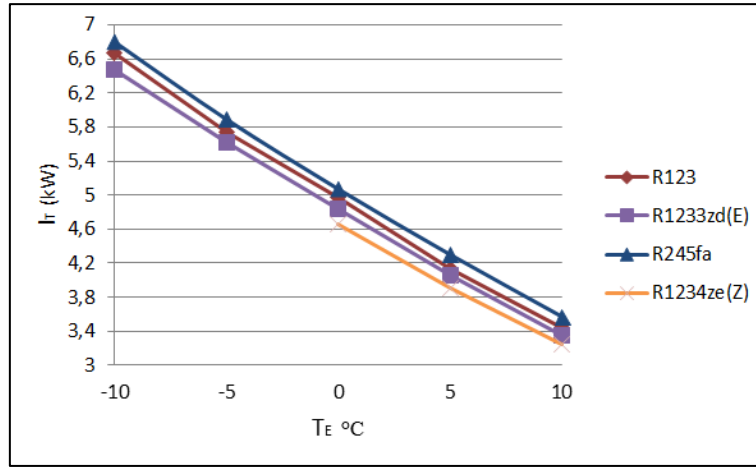
Çalışmada tasarlanan atık ısı kaynaklı ısı pompası sistemi için farklı soğutucu akışkanlarla çevrimler oluşturulmuş ve farklı durumlar için sistem performansı incelenmiştir. Sonuçlar, tüm soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığının artmasıyla COP değerinin yükseldiğini, yoğunlaşma sıcaklığının artmasıyla ise COP değerinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, evaporatör sıcaklığının artması toplam tersinmezliği azaltırken, kondenser sıcaklığının artması tersinmezliği artırmaktadır. Kompresör veriminin artmasıyla COP ve ekserji veriminin yükseldiği, tersinmezliğin ise azaldığı belirlenmiştir.



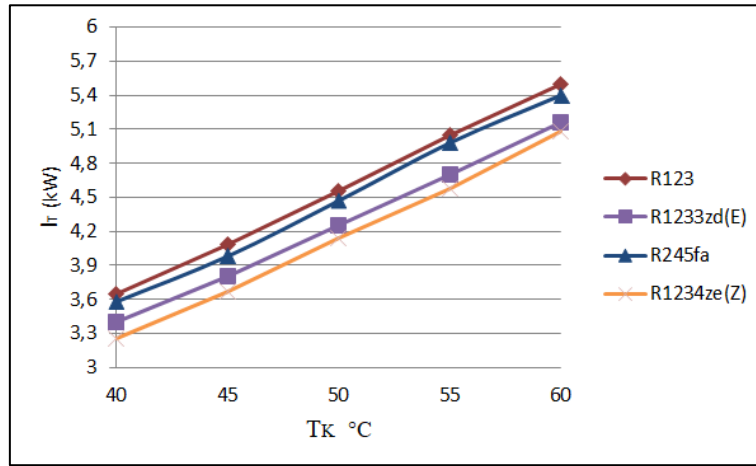
Şekil 6. COP değerinin evaporatör sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of COP depending on evaporator temperature) ($T_K=55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta_c=75$)



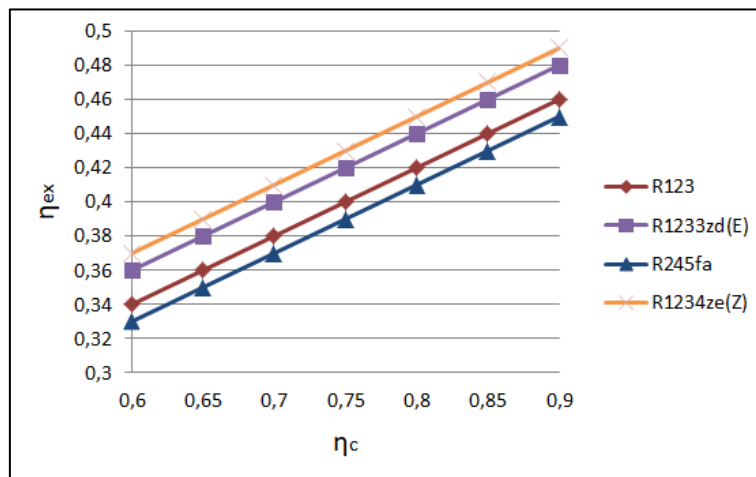
Şekil 7. COP değerinin kondenser sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of COP with condenser temperature) ($T_E=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta_c=75$)



Şekil 8. Tersinmezlik miktarının evaporatör sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of irreversibility with evaporator temperature) ($T_K=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)



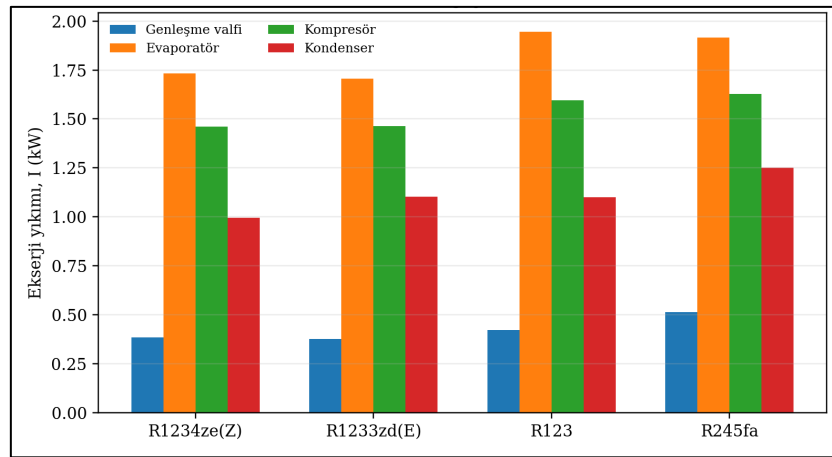
Şekil 9. Tersinmezlik miktarının kondenser sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of irreversibility with condenser temperature) ($T_E=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)



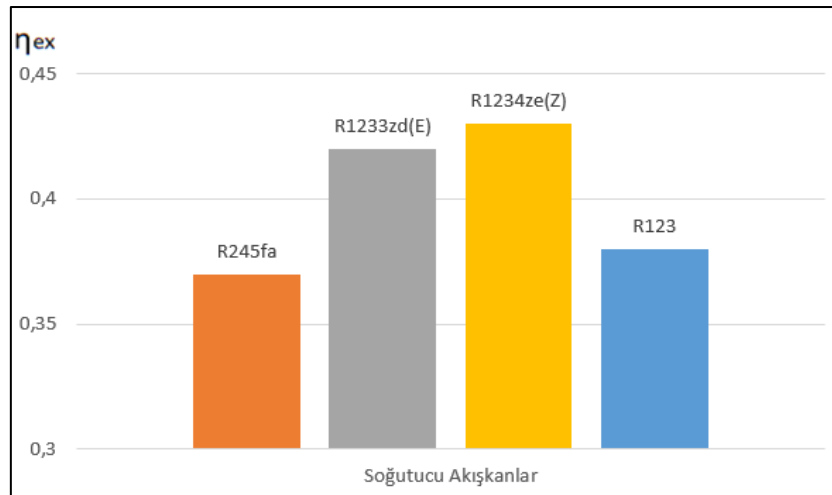
Şekil 10. Ekserji veriminin kompresör verimine bağlı değişimi (Variation of exergy efficiency with compressor efficiency) ($T_K=55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_E=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Tablo 7. Bileşen bazlı ekserji yıkımı ve toplam tersinmezlik (Component-based exergy destruction and total irreversibility)

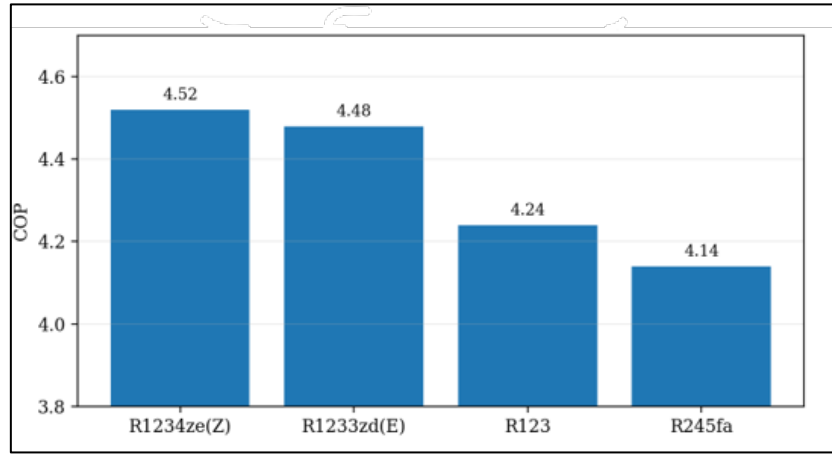
Akışkan	Genleşme valfi (kW)	Evaporatör (kW)	Kompresör (kW)	Kondenser (kW)	Toplam (kW)	Baskın bileşen
R1234ze(Z)	0.384	1.732	1.460	0.994	4.571	Evaporatör / Kompresör
R1233zd(E)	0.376	1.706	1.464	1.102	4.648	Evaporatör / Kompresör
R123	0.423	1.945	1.597	1.099	5.064	Evaporatör / Kompresör
R245fa	0.514	1.915	1.627	1.252	5.308	Evaporatör / Kompresör



Şekil 11. Bileşen bazında ekserji yıkım karşılaştırılması (Comparison of exergy destruction on a component basis)



Şekil 12. Akışkanlara göre ekserji verimindeki değişimi (Change in exergy efficiency according to refrigerants, $\eta_c=75$)



Şekil 13. Temel durumda farklı akışkanlar için COP değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of COP values for different refrigerants under base conditions)

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının tek kademeli buhar sıkıştırılmalı ısı pompalarıyla 55-58 °C sıcak su seviyesine yükseltilebileceğini göstermektedir. Yaklaşık 30 kW kondenser ısı yükü ve 4.14-4.52 aralığındaki COP değerleri, bu tür uygulamaların fabrika idari binaları, yardımcı işletme sıcak suyu ve düşük sıcaklıklı proses destek sistemleri için teknik olarak uygun olduğunu göstermektedir. Temel durumda en yüksek COP değeri R1234ze(Z) için 4.52 olarak elde edilmiştir. R1233zd(E) 4.48 COP değeriyle çok yakın performans göstermiştir. R123 ve R245fa için COP değerleri sırasıyla 4.24 ve 4.14 seviyesindedir.

R1234ze(Z) ve R1233zd(E) akışkanlarının yüksek COP değerleri, düşük GWP değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir sonuç vermektedir. R1234ze(Z) en yüksek COP ve ekserji verimini sağlarken, A2L sınıfı nedeniyle tasarımda kaçak algılama, havalandırma ve elektriksel güvenlik tedbirleri gerektirir. R1233zd(E) ise A1 güvenlik sınıfı sayesinde işletme güvenliği bakımından daha rahat bir seçenek olabilir. Bu nedenle akışkan seçimi yalnızca COP değeri üzerinden değil, çevresel etki, güvenlik sınıfı, temin edilebilirlik, kompresör uyumu ve mevzuat kısıtlarıyla birlikte yapılmalıdır.

Ekserji analizi, klasik enerji analizinin görünmez bıraktığı tersinmezlik odaklarını ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada toplam ekserji yıkımının en büyük kısmı evaporatör ve kompresör üzerinde yoğunlaşmıştır. Evaporatördeki yıkım, atık ısı suyu ile soğutucu akışkan arasındaki sonlu sıcaklık farklarından; kompresördeki yıkım ise izentropik olmayan sıkıştırma sürecinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sistem iyileştirmesinde yalnızca akışkan seçimi değil, eşanjör alanı, yaklaşım sıcaklığı, debi optimizasyonu ve kompresör verimi birlikte ele alınmalıdır.

Ekserji verimi soğutucu akışkanlar bazında incelendiğinde, en yüksek ekserji veriminin yaklaşık 0.43 ile R1234ze(Z) akışkanında elde edildiği görülmüştür. R1233zd(E) benzer performans gösterirken, R245fa ve R123 daha düşük ekserji verimine sahip olmuştur.

Hesaplamalarda gözlendiği gibi evaporatör sıcaklığının artırılması ve kondenser sıcaklığının düşürülmesi, çevrimin hem enerji hem de ekserji performansını iyileştirir. Ancak pratik tasarımda bu iki parametre, atık ısı kaynağının sıcaklık seviyesi ve ısıtma suyunun gerektirdiği minimum çıkış sıcaklığı tarafından sınırlandırılır. Bu nedenle optimum tasarım, yalnızca maksimum COP arayışı değil, kaynak-yutak uyumu ve kullanılabilir ısı ihtiyacının birlikte sağlanmasıdır.

Çalışmanın teorik olması, basınç kayıpları ve çevreye ısı kayıplarının ihmal edilmesi, sonuçların deneysel prototip veya saha ölçümü ile doğrulanmasını gerekli kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda plakalı ısı değiştirici yaklaşım sıcaklıkları, kısmi yük davranışı, yıllık işletme saati, elektrik-birim fiyatı, doğal gaz ikame kazancı ve CO₂ azaltım potansiyeli ekonomik analizle birlikte değerlendirilmelidir.

5. Kaynaklar (References)

- [1] ENVER, Isı pompası kılavuzu, <<https://enerjiverimlilik.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/IPkilavuzu.pdf>>, (accessed 10 September 2025).
- [2] S. Erdoğan, M. Yılmaz, B. Şahin, Ö. Özyurt, Isı pompası sistemleri seçimi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 92 (2006) 40-49.
- [3] Termodinamik Güneş-toprak kaynaklı ısı pompaları 1. Bölüm, <https://www.termodinamik.info/arastirma/<gunes-toprak-kaynakli-isi-pompalari-1-bolum>>, (accessed 10 September 2025).
- [4] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill Education, New York, 2015.
- [5] H. Arat, Jeotermal Kaynaklı Isı Pompasının Bölgesel Isıtma Sisteminde Kullanımının Araştırılması Ve Termodinamik Analizi, Master's Thesis, Dumlupınar University, Kütahya, Türkiye, 2016.
- [6] Ö. Saçkan, Deniz Suyu Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Termodinamik Analizi: Bir Otel Uygulaması, Master's Thesis, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, Türkiye, 2018.
- [7] S. Toksöz, S. Soyhan, Y. Topaçoğlu, İ. Taymaz, E. Büyükkaya, Toprak kaynaklı ısı pompasında ikinci yasa verimi, <www1.mmo.org.tr>, (accessed 12 August 2025)
- [8] C. Aktemur, S. G. Hacıpaşaoğlu, M. Akbıyık, Buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemlerinde R123'e alternatif olarak düşük küresel ısınma potansiyel soğutucu akışkanların termodinamik analizi, 23rd International Congress of Heat Science and Technology, 8–10 September 2021, Gaziantep, Türkiye, pp. 523–538.
- [9] F. Afshari, Ö. Çomaklı, Ş. Karagöz, H. G. Zavaragh, A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants, Energy and Buildings, 168 (2018) 272–283, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.037>.
- [10] Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Delpech, B., Olabi, V., El Samad, T., & Sayma, A. (2024). High-temperature heat pumps: Fundamentals, modelling approaches and applications. Energy, 303, 131882. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131882>
- [11] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. Energy, 152, 985-1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>
- [12] Mateu-Royo, C., Arpagaus, C., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., & Bertsch, S. S. (2021). Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. Energy Conversion and Management, 229, 113752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752>
- [13] Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., & Koyama, S. (2014). Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. International Journal of Refrigeration, 40, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.014>
- [14] Kondou, C., & Koyama, S. (2015). Thermodynamic assessment of high-temperature heat pumps using low-GWP HFO refrigerants for heat recovery. International Journal of Refrigeration, 53, 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>
- [15] Hu, B., Li, Y., Cao, F., & Xing, Z. (2017). Exergy analysis of R1234ze(Z) as high temperature heat pump working fluid. Frontiers in Energy, 11, 493-502. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0510-6>
- [16] Arpagaus, C., & Bertsch, S. S. (2021). Experimental comparison of HCFO and HFO R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(Z), and HFC R245fa in a high temperature heat pump up to 150 °C. Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea.