



## DÜŞÜK GWP AKIŞKANLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI TERMODİNAMİK ANALİZİ

\*Erkan DİKMEN<sup>1</sup>, İsmail İÇER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri  
Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

(Geliş/Received: 23.08.2024, Kabul/Accepted: 15.11.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

### ÖZ

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklardaki ısı enerjisi (yenilebilir enerji ve endüstriyel atık ısı) kaynaklarından elektrik üretebilecek organik Rankine çevrimi (ORC) sistemi için enerji analizi gerçekleştirilmiştir. ORC sistemlerinin performansını en önemli faktör iş akışkanıdır. R134a alternatif daha çevreci R512A ve R513A akışkanların ORC sistemi için teorik analiz yapılmıştır. Sistemin performans analizinde sabit buharlaştırıcının kapasitesinde farklı sıcaklıklar için her üç akışkan için karşılaştırma performans analizi gerçekleştirilmiştir. ORC sisteminde en yüksek verim sağlayacak akışkan R512A olduğu tespit edilmiştir. R512A akışkan, 65 °C buharlaştırıcı, 32 °C yoğunlaştırıcı sıcaklığında sistemin verimi %6.03 tespit edilmiştir. Ayrıca, R513A akışkanından %7.9 diğer R134a akışkanından %10.1 daha fazla verime sahip olduğu bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Organik Rankine Çevrimi, Yeni Nesil Akışkanlar, Termodinamik Analiz.

## COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ORGANIC RANKINE CYCLES WITH LOW GWP FLUID

### ABSTRACT

In this study, an energy analysis for an organic Rankine cycle (ORC) system that can generate electricity from low temperature heat energy sources (renewable energy and industrial waste heat) was performed. The most important factor in the performance of ORC systems is the working fluid. Theoretical analysis was made for the ORC system of R134a alternative more environmentally friendly R512A and R513A fluids. In the performance analysis of the system, a comparison performance analysis was performed for all three fluids for different temperatures at constant evaporator capacity. It was determined that R512A is the fluid that will provide the highest efficiency in the ORC system. The efficiency of the system was determined as 6.03% at R512A fluid, 65 °C evaporator and 32 °C condenser temperature. In addition, it was found to have 7.9% more efficiency than R513A fluid and 10.1% more efficiency than R134a fluid.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle, New Generation Fluids, Thermodynamic Analysis.

## 1. Giriş (Introduction)

Bilim ve teknolojinin gelişmesi ile artan nüfus ve nüfusun daha iyi bir yaşam kalitesine yönelik eğilimi, gün geçtikçe enerji gereksinimleri artırmaktadır. Buna bağlı olarak Konvansiyonel birincil enerjinin (kömür, petrol, doğal gaz) artan tüketimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yeterli seviyede olmaması sebepleriyle çevresel sorunlar artmaktadır. Düşük ısı kaynağından elektrik enerjine dönüştürmek için en etkili yöntemlerden biri organik Rankine çevrimidir. Organik Rankine çevriminin (ORC) ısı kaynağı, atık ısı, biokütle, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi düşük ve orta dereceli ısı kaynaklarıdır. ORC çevrimlerinde, iş akışkanı su kullanılan Rankine çevrimlerinin aksine sudan daha düşük kaynama sıcaklığına sahip organik soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Bu akışkanların kimyasal bileşimine bağlı olarak, kloroflorokarbonlar (CFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), hidroflorekarbonlar (HFC), hidrofloroeterler (HFE), hidrofloroolefinler (HFO), hidrokarbonlar (HC) ve doğal soğutucular (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, vb.) sınıflandırılır. ORC iş akışkanlarından CFC ve HCFC grubu akışkanlar çevreye zararlı olduğu için Kyoto ve Montreal protokollerin de alınan kararlarla 2010 yılında yasaklanmıştır. Kısmen zararlı HFC grubu akışkanlar 2018 Kigali Değişikliği yönetmeliğine göre kullanımı %80 den fazla azaltılması planlanmıştır [1].

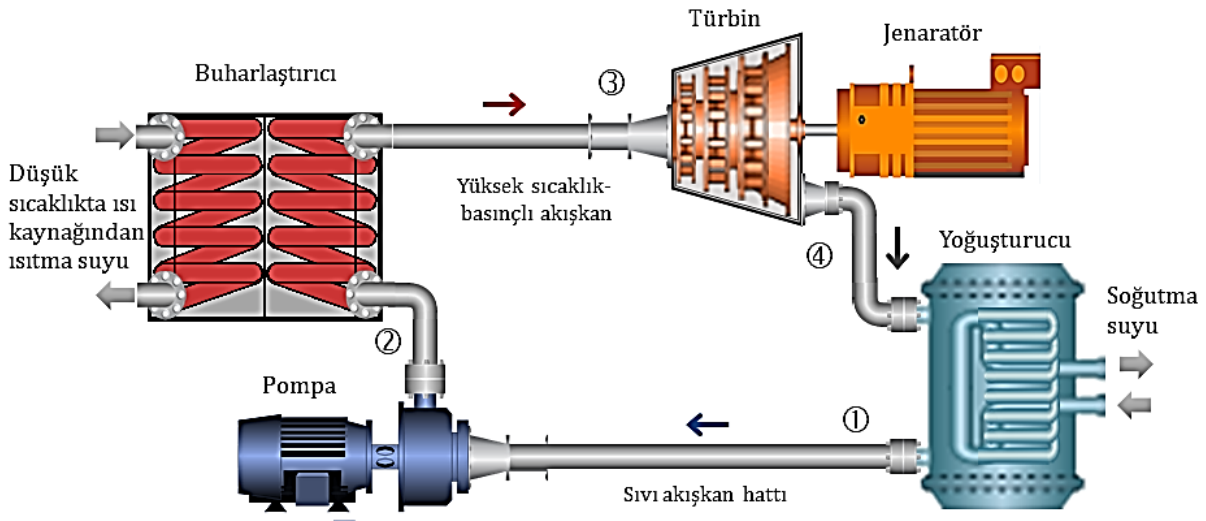
Çevre dostu, yeni nesil soğutucu akışkanların geliştirilmesiyle beraber ORC konusunda çok sayıda araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Invernizzi (2016) ve ark. yaptıkları çalışmada, ara kızdırmalı ORC sisteminde R134a yerine R1234yf ve R1234ze(E) kullanılmasında performans değişimini araştırmışlardır. Aspen Plus yazılımıyla yaptıkları analiz sonucunda türbin gücünün HFO-1234yf ve HFO-1234ze(E) kullanan çevrimler için sırasıyla yaklaşık %20 ve %28 daha düşük sonuçlar verdiğini ve 200-250 °C sıcaklıklarda R1234yf akışkanın çevrimde kullanılmasının uygun olduğunu tespit etmişlerdir [2]. Ancona (2022) ve ark., bir ailenin enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecek güçte güneş enerjisi destekli mikro ORC sistemini R134a, R1234yf, R1234ze(E), R1243zf, R513A ve R515A akışkanlarıyla performans analizi yapmışlardır. Yıllık talep edilen enerjinin % 39 unu R134A akışkanlı ORC sistemi karşılarken R1234yf akışkanı %16 ve R513A karışım akışkanı %17.5 karşıladığını analiz sonucunda tespit etmişlerdir [3]. Kajurek ve ark., (2019), Düşük sıcaklıkta (80~100 °C) atık ısıyı kullanan ORC sistemine uygun 10 farklı çalışma akışkanı (R134a, R152a, R227ea, R236fa, R245fa, R290, R600a, R717, R1234yf, R1234ze) belirlemişlerdir. Teorik analiz sonucunda en iyisi %5.68 verim ile R717 (amonyak) olduğunu tespit etmişlerdir. R245fa akışkanla 1 kW'lık ORC sisteminin deneysel veriler ile yaptıkları analizde sistemin %2.51 ısı verimle çalıştığını tespit etmişlerdir [4]. Saleh (2016) çalışmasında, düşük sıcaklıktaki ısı enerjisine uygun organik Rankine çevrimi ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimli (ORC-VCR) birleşik sistemin, 10 adet çalışma akışkanıyla (R1270, R290, RC318, R236fa, R600a, R236ea, R600, R245fa, R1234yf ve R1234ze(E)) performansını araştırmıştır. Analizler sonucunda en performanslı akışkanların R245fa ve R600 olduğunu tespit etmiştir. Akışkanlardan, R245fa'nın yanıcı olmadığını, R600'ün daha çevreci olduğu çalışmada vurgulanmıştır [5]. Saleh (2018) çalışmasında, düşük sıcaklıktaki ısı enerjisine uygun organik Rankine çevrimi ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimli (ORC-VCR) birleşik sistemde, 14 adet çalışma akışkanıyla (R600, R600a, R601, R601a, R602, RC318, C5F12, R152a, R236ea, R236fa, R245ca, R245fa, RE245cb2 ve R1234ze(E)) farklı çalışma parametrelerinde sistemin performansını araştırmıştır. 70 °C ila 110 °C sıcaklık aralığında düşük sıcaklıklar için en uygun iş akışkanı R602 olduğunu ve sistem veriminin en yüksek %53.8 olduğunu tespit etmiştir [6]. Karadağ (2022) tez çalışmasında, 90 °C düşük sıcaklıkta çalışan ORC sisteminin tüm ekipmanların çalışma performansını analiz edilebileceği MATLAB tabanlı "ORC Designer" programı geliştirmiştir. ORC sisteminde 9 farklı akışkan (R218, n-pentan, izo-pentan, R245fa, R123, n-bütan, R236fa, izo-bütan, R134a) için sistem üzerinde ayrı ayrı performans analizleri gerçekleştirmiştir. En yüksek net verim %4.32 sahip n-pentan akışkanı tespit etmiştir [7].

Son yıllarda çevresel zararları daha az olduğu için Hidrofloroolefin (HFO) grubu soğutucu akışkanlı ORC sistemleriyle ilgili literatür çalışmaları özetlenmiştir. Bu çalışmada, çevreye verdiği zararlardan dolayı gelecekte tamamen yasaklanacak R134a akışkanına alternatif olarak geliştirilmiş R512A ve R513A akışkanlarıyla karşılaştırmalı performans araştırılmıştır [8].

## 2. ORC Sistemi Termodinamik Analiz (ORC System Thermodynamic Analysis)

Organik Rankine Döngüsü (ORC), geleneksel Rankine çevriminin verimli olmadığı orta-düşük sıcaklıktaki ısıyı mekanik işe dönüştürmek için kullanılan bir termodinamik çevrimidir. Çevrimde organik bir iş akışkanı kullanılır. ORC dört temel bileşenden oluşur (Şekil 1): pompa, buharlaştırıcı (kazan, ısı eşanjörü), türbin ve yoğunlaştırıcı. Çevrim, sıvı haldeki iş akışkanının pompa tarafından

basıncının artırılmasıyla başlar, daha sonra buharlaştırıcıda harici bir enerji kaynağı tarafından ısıtılır. Basıncı ve sıcaklığı artmış olan iş akışkanını, mekanik iş üretmek için türbinde genişleyerek buharlaşır. Ardından akışkan, kondansatörde sıvı haline geri yoğunlaştırılır ve çevrim tamamlanır [9].



**Şekil 1.** Organik Rankine Çevrimi (Organic Rankine Cycle) [9].

ORC sisteminde iş akışkanı, çevrimin enerji üretme kapasitesini ve verimliliğini belirleyen en önemli husustur. İş akışkanı, ilk başta ısı kaynağından aldığı ısı enerjisini absorbe ederek buharlaşır, türbinde genişleyerek iş üretir ve yoğusturucuya geldiğinde sahip olduğu ısı enerjini atarak sıvılaşır. Bu süreçte pompa akışkanın basıncını artırır. ORC sisteminde iş akışkanının belirlenmesi, sistemin verimliliği ve çevresel etkiler en önemli faktörlerdir. Bununla beraber, akışkanın güvenlik sınıfı, kimyasal sahip olduğu özellikler ve kolay-ekonomik elde edilebilir olması, başarılı ve sürdürülebilir bir ORC sistemi tasarımı için kritik öneme sahiptir. Çalışmada performans analizi için kullanılan iş akışkanlarının özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur.

**Çizelge 1.** İş akışkanlarının özellikleri (Features of work fluids) [10,11]

İş Akışkanları	Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	Kaynama Noktası (°C)	Kritik Sıcaklık (°C)	Güvenlik Sınıfı	ODP	GWP (100yıl)
R134a	102.0	-26.0	101.1	A1	0	1300
R513A	108.4	-29.2	97.70	A1	0	573
R512A	67.20	-24.0	113.51	A2	0	185

**A1:** Alevlenme özelliği yok olduğunu ifade eder.

**A2:** Düşük yanıcı olduğunu ifade eder.

**ODP:** Ozon delme/tüketme potansiyeli (Ozone Depletion Potential)

**GWP:** Küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential)

ORC sisteminin termodinamik analizinde tüm sistem elemanları sürekli-akışlı açık sistem olarak analizi yapılır. Genel olarak enerjini denkliği [9];

$$(\dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{çıkan}) + (\dot{W}_{pompa} - \dot{W}_{türbin}) = \dot{m}_r(h_{çıkan} - h_{giren}) \quad (1)$$

ORC'nin, pompa, buharlaştırıcı, türbin ve kondenserden dört temel sistem elemanları için enerji dengesi ve verimi ile ilgili denklemler Çizelge 2'deki gibidir. ORC'nin termodinamik analizinde

- Kazan ve yoğusturucu da iş etkileşimi yoktur
- Türbin ve pompa meydana gelebilecek hal değişimleri izentropik kabul edilmiştir.

**Çizelge 2.** ORC sisteminin termodinamik eşitlikleri (Thermodynamic equations of the ORC system) [9].

Bileşen	Denklem
Buharlaştırıcı (kW)	$\dot{Q}_{buharlaştirıcı} = \dot{m}_r(h_3 - h_2)$ (2)
Türbin (kW)	$\dot{W}_{Türbin} = \dot{m}_r(h_3 - h_4)$ (3)
Yoğuşturucu (kW)	$\dot{Q}_{yoğuşturucu} = \dot{m}_r(h_4 - h_1)$ (4)
Pompa (kW)	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) = \dot{v}_r(P_2 - P_1)$ (5)
Verim	$\frac{\dot{W}_{Türbin} - \dot{W}_{pompa}}{\dot{Q}_{buharlaştirıcı}} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_{buharlaştirıcı}}$ (6)

*P* : Basınç (kPa)  
*h* : Entalpi (kJ/kg)  
*m<sub>r</sub>*: İş akışkanının debisi (kg/s)  
*v<sub>r</sub>* : İş akışkanının hacimsel debisi (m<sup>3</sup>/s)

Küçük ölçekli enerji santrallerinde kullanılan ORC sisteminin çalışma aralığına göre belirlenmiş parametreler ve varsayımlar Çizelge 3’te sunulmuştur. ORC’nin R-134a, R152A ve R153A için her bir akışkanın kullanıldığı kabulü ile teorik olarak analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır [8].

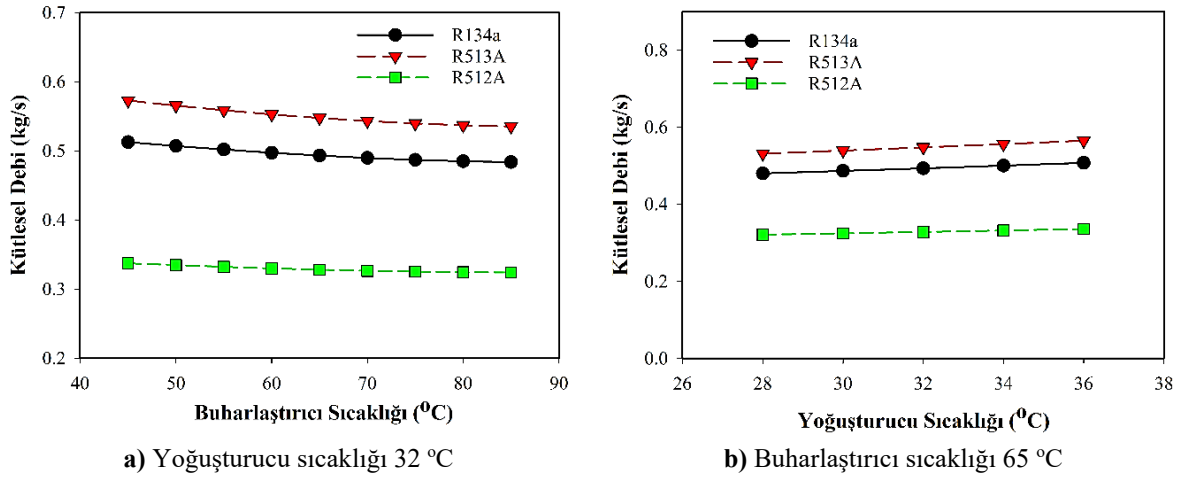
**Çizelge 3.** Termodinamik analiz için kabuller (Assumptions for thermodynamic analysis)

Açıklama	Değerler
Buharlaştırıcı kapasitesi (kW)	100
Buharlaşma sıcaklığı (°C)	45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85
Yoğuşturucu sıcaklıkları (°C)	28, 30, 32, 34, 36

### 3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

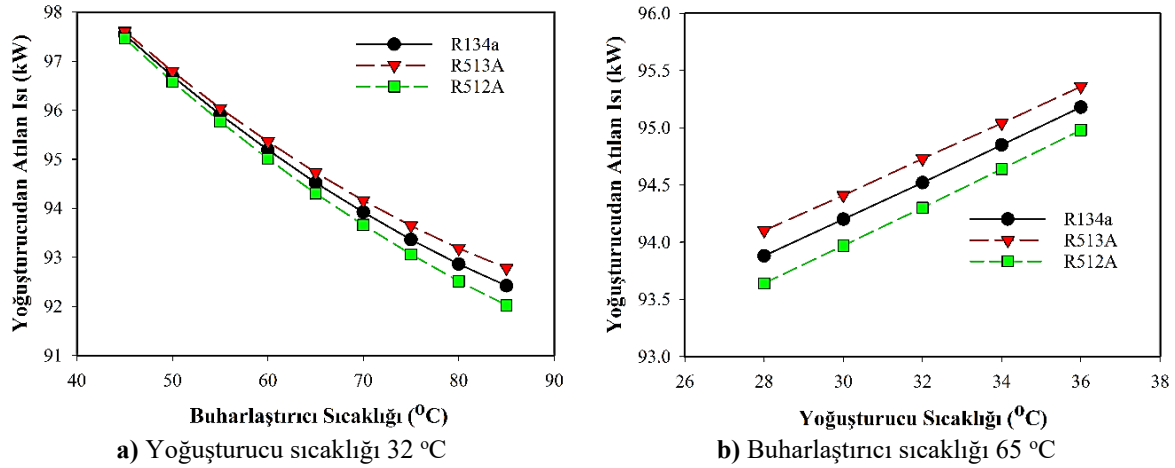
R134a, R513A ve R512A akışkanlarının analiz sonuçları, ortalama yoğuşma sıcaklığı 32 °C göre 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 ve 85 °C buharlaşma sıcaklığında değişimler ile ortalama buharlaşma sıcaklığı 32 °C göre 28, 30, 32, 34 ve 36 °C yoğuşturucu sıcaklığında değişimlere ait grafikler sunulmuştur.

ORC sistemin verimliliği, ekonomikliği ve tasarımı üzerinde debi önemli bir faktördür. Akışkan debisinin yüksek olması türbinde güç üretimi artması üzerine olumlu etkisi varken pompadan tükettiği enerjiyi artırmaktadır. Ayrıca sistemde kullanılacak organik iş akışkanının miktarı fazla olması durumunda akışkan maliyeti olarak karşımıza çıkar. Şekil 2 de Buharlaştırıcıda başka bir değişle ısı kaynağının sıcaklığı artıkça ve yoğuşturucunun sıcaklığı düştükçe iş akışkanlarının debisi azaldığı görülmektedir. Sıcaklığa bağlı soğutucu akışkanlarının debilerin değişimi R513A için 0.573 – 0.535 kg/s, R134a için 0.513 – 0.484 kg/s ve R512A için 0.337 – 0.324 kg/s arasında değişmektedir.



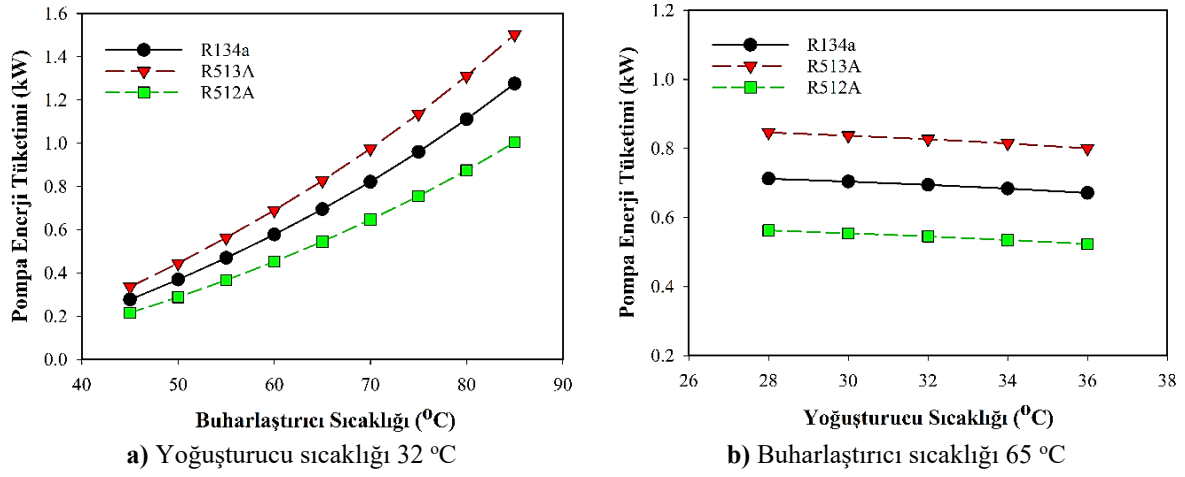
**Şekil 2.** Yoğuşturucu/buharlaştırıcı sıcaklığına bağlı akışkanın debi değişimi (Condenser/evaporator temperature dependent fluid flow rate variation)

Yoğuşturucudan atılan ısı, ORC sistemindeki iş akışkanın soğutularak sıvılaştırılması için gerekli enerjiyi ifade eder. Akışkan debisi azaldıkça yoğuşturucudan atılan ısı miktarı da azalır. Başka bir deyişle, yoğuşturucuya ulaşan buharın enerji içeriğini düşürür, bu da verimliliği yükseltir. Sabit buharlaştırıcı kapasitesi, 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında, buharlaştırıcı (ısı kaynağı) sıcaklığının artmasıyla yoğuşturucudan atılan ısı azaldığı Şekil 3 görülmektedir. 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında 85 °C buharlaştırıcı sıcaklığında R134a için 92.42 kW, R513A için 92.78 kW ve R512A için 92.02 kW en düşük değerlere sahiptir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında, yoğuşturucu sıcaklığı arttıkça yoğuşturucudan atılan ısı miktarı artmaktadır. Buna göre en düşük yoğuşturucudan atılan ısı, 28 °C yoğuşturucu sıcaklığında R513A için 95.36 kW, R134a için 95.18 kW ve R512A için 94.98 kW olduğu tespit edilmiştir.



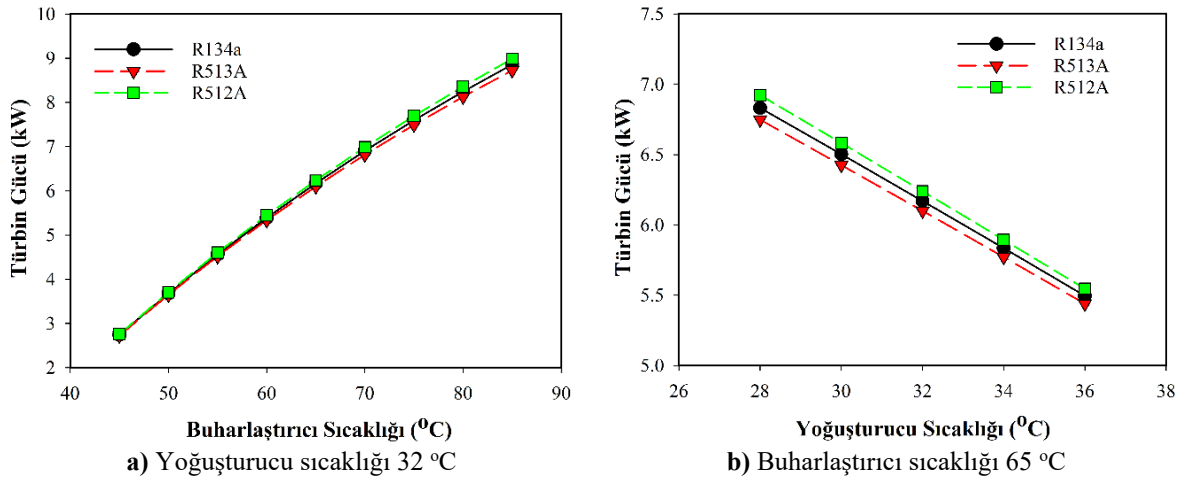
**Şekil 3.** Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkan sıcaklığına bağlı yoğuşturucudan atılan ısı miktarının değişimi (Variation amount of heat removed from condenser depending on condenser/evaporator flow temperature)

OCR sisteminde pompanın tükettiği enerji debiye ve basınca bağlıdır. Şekil 4 de buharlaştırıcıya ve yoğuşturucu sıcaklığına bağlı pompanın enerji tüketim grafikleri görülmektedir. 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında pompanın tükettiği enerji, buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça arttığı görülmekte ve en düşük enerji tüketiminin 45 °C buharlaştırıcı sıcaklığında R513A için 0.335 kW, R134a için 0.277 kW ve R512A için 0.215 kW tespit edilmiştir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında pompanın tükettiği enerji, yoğuşturucu sıcaklığı arttıkça azaldığı görülmekte ve en düşük enerji tüketiminin 36 °C yoğuşturucu sıcaklığında R513A için 0.801 kW, R134a için 0.671 kW ve R512A için 0.523 kW tespit edilmiştir.



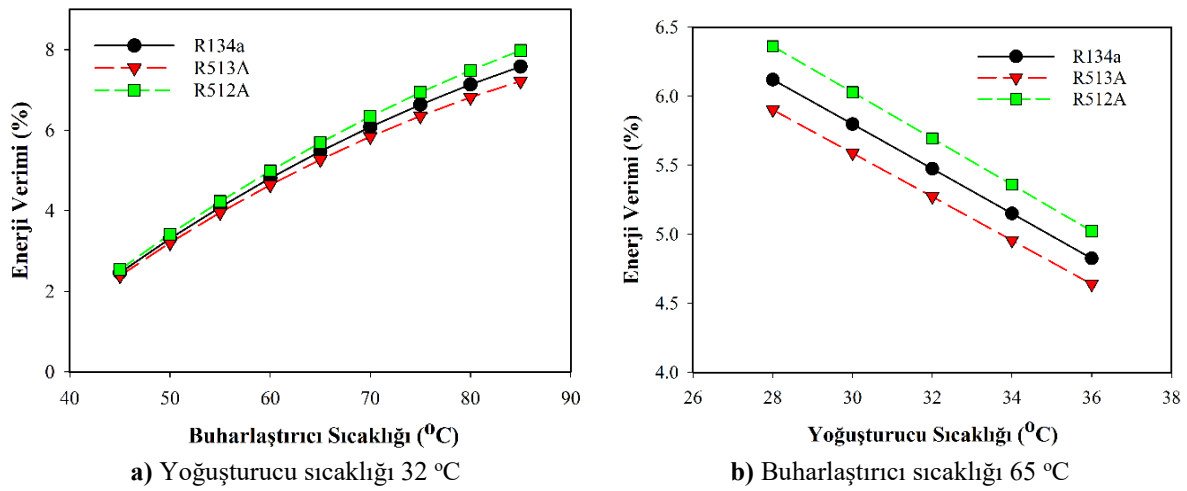
Şekil 4. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanın sıcaklığına bağlı pompanın enerji tüketimi (Pump energy consumption depending on condenser/evaporator flow temperature)

ORC sisteminde enerji üretimi türbinde gerçekleşir. Türbine giren akışkanın entalpisi ne kadar yüksek olursa ve türbinden çıkan akışkanın entalpisi düşük olursa türbinin çıkışında daha yüksek bir enerji üretimi sağlanır. Buharlaştırıcının ve yoğuşturucunun sıcaklığa bağlı türbin gücü değişimleri Şekil 5 de görülmektedir. 32 °C yoğuşma sıcaklığı buharlaştırıcı sıcaklığının artmasıyla türbin gücü artmakta ve üç akışkanda üretilen güç birbirine yakındır. Buna göre akışkanların türbin gücünün en yüksek olduğu 85 °C buharlaşma sıcaklığında 8.7 – 9 kW arasında türbin gücü üretildiği tespit edilmiştir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında, yoğuşma sıcaklığı artıkça türbin gücü azalmaktadır. Türbin güçleri tüm akışkanlar için birbirine yakın ve en fazla türbin gücünün elde edildiği 28 °C yoğuşma sıcaklığında 6.7 – 6.9 kW türbin gücü üretildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanın sıcaklığına bağlı türbin gücü (Condenser/evaporator flow temperature dependent turbine power)

ORC sistemindeki enerji (ısı) verim analizi, çevrimin enerji performansının göstergesidir. Sistemin buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıklarına bağlı enerji verim değişim şekil 6 görülmektedir. 32°C yoğuşma sıcaklığında buharlaştırıcı sıcaklığı artıkça verim artmıştır. En yüksek verimin elde edildiği 85°C buharlaşma sıcaklığında verim, R512A için 0.0079, R134a için 0.0076 ve R513A için 0.0072 tespit edilmiştir. 65°C buharlaşma sıcaklığında, yoğuşturucu sıcaklığı artıkça verim azalmaktadır. En yüksek verimin elde edileceği 28°C yoğuşturucu sıcaklığında verim, R512A için 0.0064, R134a için 0.0061 ve 0.0059 bulunmuştur.



**Şekil 6.** Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanların sıcaklığına bağlı ORC enerji verimi (ORC energy efficiency depending on fluid temperature in the condenser/evaporator)

#### 4. Sonuç (Results)

Çalışmada, R134a alternatif olarak geliştirilmiş R512A ve R513A iş akışkanlarının ORC sistemi için her üç akışkan için karşılaştırmalı performansları incelenmiştir. Her üç akışkanın sıcaklığa göre türbin gücü birbirlerine yakın olmasına rağmen sistemin verimi incelendiğinde en iyi performans R512A olduğu tespit edilmiştir. R513 A akışkanın performansı R134a dan düşük olduğu görülmüştür. OCR sisteminin ortalama buharlaştırıcı (65°C) ve yoğuşturucu (32°C) sıcaklığında;

- Kütleli debisi en az olan R512A akışkanı 0.3279 kg/s dir. R512A akışkanı R134a akışkanından %33.5, R 513A akışkanından % 40.1 daha az debiye sahiptir.
- Yoğuşturucudan atılan ısı en az olan R512A akışkanı 94.3 kW'dır. Diğer akışkanlarında yoğuşturucudan atıkları ısı miktarı çok yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.
- Pompanın enerji tüketimi en az olan R512A akışkanı 0.545 kW'dır. R512A akışkanı R134a akışkanından %21.5, R 513A akışkanından % 34.1 daha az pompa enerjisine ihtiyaç duyuyor.
- Türbin gücü en yüksek R512A akışkanı 6.24 kW'dır. Diğer akışkanlar içinde türbin gücü birbirine çok yakın tespit edildi.
- Enerji verimliliği en yüksek R512A akışkanı % 6.03'dür. R512A akışkanı R134a akışkanından %10.1, R 513A akışkanından % 7.9 daha fazla verime sahiptir.

OCR sistemleri, düşük sıcaklıklarda yenilenebilir ve atık ısı enerjilerinden en verimli elektrik üretilen sistemlerin başında gelir. ORC sistemin güç üretiminde en önemli ekipman iş akışkanıdır. İş akışkanların hem verimli hem de çevreye zarar vermeyenler geliştirildikçe performans analizler devam edecektir.

#### 5. Teşekkür (Acknowledgements)

Bu çalışma, “Düşük GWP’li akışkanlarla çalışan organik rankine çevriminin termodinamik ve çevresel analizi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş olup ISUBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’ne sağladığı imkânlardan dolayı teşekkür ederiz.

## 6. Kaynaklar (References)

- [1] E.A. Heath, Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Kigali Amendment), *Int. Leg. Mater.* 56 (2017) 193–205. doi:10.1017/ilm.2016.2.
- [2] C.M. Invernizzi, P. Iora, M. Preißinger, G. Manzolini, HFOs as substitute for R-134a as working fluids in ORC power plants: A thermodynamic assessment and thermal stability analysis, *Appl. Therm. Eng.* 103 (2016) 790–797. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.101.
- [3] M.A. Ancona, M. Bianchi, L. Branchini, A. De Pascale, F. Melino, A. Peretto, C. Poletto, N. Torricelli, Solar driven micro-ORC system assessment for residential application, *Renew. Energy* 195 (2022) 167–181. doi:10.1016/j.renene.2022.06.007.
- [4] J. Kajurek, A. Rusowicz, A. Grzebielec, W. Bujalski, K. Futyma, Z. Rudowicz, Selection of refrigerants for a modified organic Rankine cycle, *Energy* 168 (2019) 1–8. doi:10.1016/j.energy.2018.11.024.
- [5] B. Saleh, Parametric and working fluid analysis of a combined organic Rankine-vapor compression refrigeration system activated by low-grade thermal energy, *J. Adv. Res.* 7 (2016) 651–660. doi:10.1016/j.jare.2016.06.006.
- [6] B. Saleh, Energy and exergy analysis of an integrated organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system, *Appl. Therm. Eng.* 141 (2018) 697–710. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.06.018.
- [7] M. Karadaş, Düşük entalpili jeotermal kaynakları kullanarak organik rankine çevrimi elektrik santrali tasarımı, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, 2022.
- [8] İ. İçer, Düşük GWP'li akışkanlarla çalışan organik rankine çevriminin termodinamik ve çevresel analizi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2024.
- [9] Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu, *Thermodynamics: an engineering approach*, (2011). [https://www.academia.edu/download/55284132/Solution\\_Manual\\_8th\\_Ed.pdf](https://www.academia.edu/download/55284132/Solution_Manual_8th_Ed.pdf) (erişim 26 Nisan 2024).
- [10] A. Mota-Babiloni, P. Makhnatch, R. Khodabandeh, J. Navarro-Esbrí, Experimental assessment of R134a and its lower GWP alternative R513A, *Int. J. Refrig.* 74 (2017) 680–686. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.11.021.
- [11] EcoGas, R512A Physical Properties, (y.y.). <https://ecogas.ie/product/r512a-ashrae-listed-high-purity-alternative-refrigerant-refill/>.