



Araştırma Makalesi – Research Article

Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sisteminde R404A Alternatifi GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanılmasının Termodinamik Analizi

Thermodynamic Analysis of Using with Low GWP Refrigerants Alternative of R404A in Vapor Compression Refrigeration System

Nazan Sevtap Can¹, Ragıp Yıldırım², Arzu Şencan Şahin^{3*}

Geliş / Received: 20/12/2023

Revize / Revised: 13/02/2024

Kabul / Accepted: 15/02/2024

ÖZ

Isıtma ve soğutma endüstrisinde çalışma akışkanı olarak soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Çevresel sorunların artmasıyla birlikte dünyada giderek artan sera gazı emisyonu, küresel ısınma gibi çevresel problemlerin önüne geçmek için çevreye zarar veren akışkanların kullanımı azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda birçok soğutucu akışkan geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu çalışmada, küresel ısınma potansiyeli (GWP) yüksek olan R404A yerine alternatif soğutucu akışkanlarının kullanıldığı buhar sıkıştırılmalı soğutma sisteminin teorik analizi, mühendislik denklem çözücü (EES) programı kullanılarak yapılmıştır. Buhar sıkıştırılmalı soğutma sisteminde GWP değeri düşük olan R454A, R454C, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Soğutucu akışkanların termodinamik özellikleri REFPROP yazılımından alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek soğutma performans katsayısı (COP) değeri, kondenser sıcaklığı 30°C ve evaporatör sıcaklığı 5 °C iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 8.03 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, COP değeri 7.94 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30°C ve evaporatör sıcaklığı -5°C iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.59 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.58 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji yıkımının ise soğutma sisteminin evaporatöründe olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, R457A'nın hem GWP hem de COP ve ekserji verimliliği açısından R404A yerine kullanılabilir en uygun alternatif soğutucu akışkanlardan biri olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Soğutma, enerji, ekserji Yeni nesil soğutucu akışkanlar

ABSTRACT

Refrigerants are used as working fluids in the heating and cooling industry. In order to prevent environmental issues such as greenhouse gas emissions and global warming, which are on the rise due to increasing environmental problems worldwide, the use of environmentally harmful fluids is tried to be reduced. In this study, the theoretical

¹İletişim: cnazansevtap@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1002-9109>)

Makine Mühendisliği, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

²İletişim: ryildirim@mehmetakif.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0902-3420>)

Elektrik ve Enerji, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

^{3*}Sorumlu yazar iletişimi: arzusencan@isparta.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8519-4788>)

Makine Mühendisliği, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

analysis of a vapor compression refrigeration system using alternative refrigerants instead of R404A, which has a high global warming potential (GWP), was carried out using the Engineering Equation Solver (EES) program. R454A, R454C, R455A, R457A and R459B refrigerants with low GWP were used in the vapor compression refrigeration system. The thermodynamic properties of the refrigerants were obtained from REFROP software. As a result of the analysis, the highest coefficient of performance (COP) value was found to be 8.03 in the system operating with R457A refrigerant when the condenser temperature was 30°C and the evaporator temperature was 5°C. Under the same conditions, the COP value was found to be 7.94 in the system operating with R404A refrigerant. The highest exergy efficiency was found to be 0.59 in the system operating with R457A refrigerant when the condenser temperature was 30°C and the evaporator temperature was -5°C. Under the same conditions, the exergy efficiency was found to be 0.58 in the system operating with R404A refrigerant. The highest exergy destruction was observed in the evaporator of the cooling system. As a result, it was determined that R457A is one of the most suitable alternative refrigerants that can be used instead of R404A in terms of both GWP and COP and exergy efficiency.

Keywords- Cooling, energy, exergy, new generation refrigerants

I. GİRİŞ

Soğutma, ısı pompası sistemleri ve organik Rankine çevrimlerinde kullanılan R134a, R410A ve R404A gibi yüksek GWP (küresel ısınma potansiyeli) değerine sahip soğutucu akışkanlar, iklim değişikliği üzerindeki etkileri nedeniyle aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmaktadır. Bu nedenle çevre dostu aynı zamanda yüksek enerji performansına sahip soğutucu akışkanların kullanılması önemlidir. Bazı ülkeler veya kuruluşlar, sera gazlarını sınırlandırmak için alternatif soğutucu akışkanların geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla bir dizi yasa ve yönetmelik yayınlamıştır. Avrupa Birliği 2015 yılında HFC'leri (Hidroflorokarbonlar) azaltmaya başlamıştır ve yayınlanan F-gaz yönetmeliği 2030 yılı sonuna kadar HFC soğutucu akışkanlarının %79'unu aşamalı olarak ortadan kaldırmayı planlamaktadır. Aynı zamanda, kullanılabilir soğutucu akışkanların GWP değeri de belirtilmiştir [1,2]. Türkiye'de 2010 yılından itibaren CFC (kloroflorokarbon) ve HCFC (Hidrokloroflorokarbon) soğutucu akışkanların kullanımı yasaklanmıştır. HCF'lerin ise 2030 yılına kadar kullanımına müsaade edilmektedir. Dolayısıyla, R404A gibi soğutucu akışkanların küresel ısınma üzerindeki etkisi önemli olduğundan, yüksek GWP'li HFC'ler HCFC'lerin yerini alacak en uygun seçenek olarak görülmemektedir. Küresel iklim değişikliği üzerinde yüksek etkiye sahip bu soğutucu akışkanların yerini alacak alternatif soğutkanlara yönelik teşvik de artmaktadır [3].

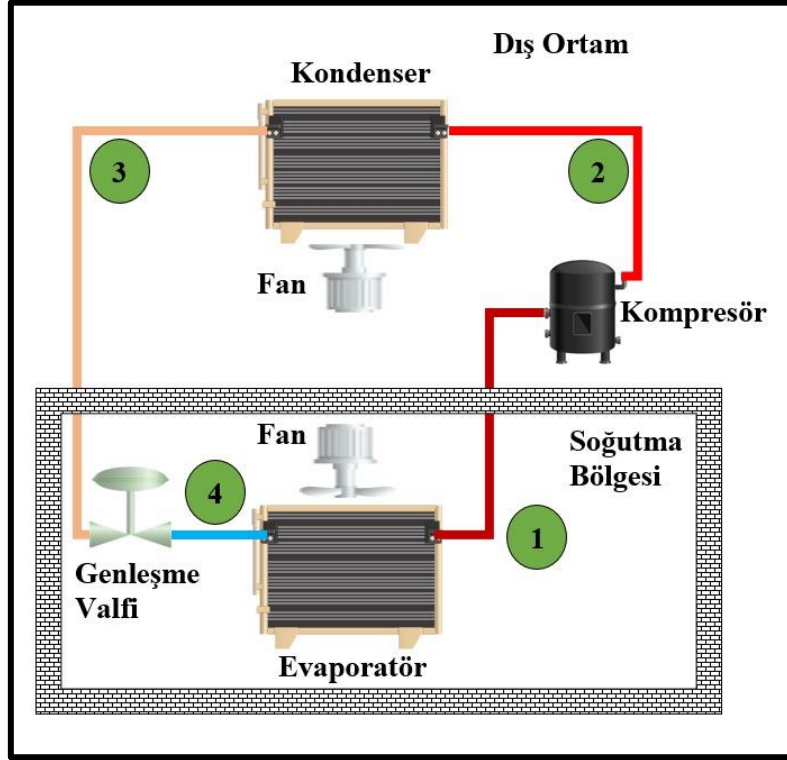
Literatürde, R404A ve alternatiflerine ilişkin bazı çalışmalar yer almaktadır. Altınkaynak çalışmasında R404A'ya alternatif soğutucu akışkanlar R455A, R454C, R452A için bir soğutma sisteminin kapsamlı bir termodinamik performans analizi yapmıştır. R455A, R454C, R452A ve R404A için COP değerleri sırasıyla 2.63, 2.30, 2.31 ve 2.47' dir. R455A, R454C, R452A ve R404A için ekserji değerleri sırasıyla % 43.9, %38.7, %38.8 ve %42.3 olarak bulunmuştur. Bu alternatifler soğutkanlar arasında en iyi akışkanın R455A olduğu tespit edilmiştir [4]. Devocioğlu ve Oruç çalışmalarında soğutma sistemlerinde kullanılan R404A ve R452A soğutucu akışkanlarını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. R452A kullanıldığında COP değerinin R404A'dan yaklaşık %3 ila %8 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Sistemin güç tüketimi de yaklaşık %5 oranında azaltılmıştır [5]. Oruç ve Devocioğlu yaptıkları çalışmalarında R404A'yı, R454A ve R454C ile deneysel olarak karşılaştırmışlardır. R454A ve R454C' nin COP değerlerinin R404A'dan sırasıyla yaklaşık %14 ve %10 daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir [6]. Llopis ve ark., R404A'ya alternatif olan daha düşük GWP değerlerine sahip R459B, R454C, R455A ve R457A soğutucu akışkanlarının enerji performansını deneysel olarak araştırmıştır. R454C, R459B, R457A, R455A'nın enerji tüketiminin R404'e göre sırasıyla %2.45, %11.55, %10.69 ve %2.9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [7]. Yıldırım vd., R404A ve R454C soğutucu akışkanlarının enerji ve çevresel performansını, farklı evaporatör ve kondenser sıcaklığı için karşılaştırmışlardır. R454C, R404A'dan yaklaşık %4 daha yüksek bir COP değerine sahipken, yaşam döngüsü iklim performansının yaklaşık %3.5 daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir [8]. Ender, çalışmasında R404A soğutucu akışkanı kullanan buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde herhangi bir değişiklik olmaksızın R404A yerine R442A ve R453A kullanımını deneysel olarak incelemiştir. R442A ve R453A'nın soğutma kapasitelerinin R404A'ya göre sırasıyla %6.92 ve %3.10 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [9]. Mendoza-Miranda vd., R134a ve R404A'nın yerine kullanılabilen R448A ve R450A soğutkanlarının soğutma sistemlerindeki performansını araştırmışlardır [10]. Mota-Babiloni vd., R404A'ya alternatif R448A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemi güç tüketimi, soğutma kapasitesi ve COP değerleri açısından kıyaslamışlardır [11]. Li yaptığı çalışmada, R404A akışkanı yerine kullanılabilen R452A akışkanının R404A'ya göre sera gazı emisyonlarını %5-15 oranında azalttığını göstermiştir [12].

Literatür özetlerinde görüldüğü gibi, R404A'nın alternatifleri olan akışkanlarla ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Ancak R454A, R454C, R455A, R457A, R459B soğutkanlarının hepsinin karşılaştırmalı olarak

incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada; R404A ve R404A'ya alternatif beş soğutucu akışkanla çalışan soğutma sistemi enerji ve ekserji performansları açısından karşılaştırılmıştır. Teorik olarak yapılan analizlerde EES programı kullanılmıştır. Literatürde çoğunlukla bu alternatif soğutucu akışkanlar ayrı ayrı incelendiğinden birbirleriyle aynı çalışma parametrelerinde karşılaştırma imkânı olamamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, bahsedilen alternatif soğutkanların hepsi aynı çalışma parametrelerinde mukayese edildiğinden en uygun soğutucu akışkanın belirlenmesi mümkün olmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, R404A'ya alternatif soğutucu akışkanların kullanıldığı ve şematik diyagramı Şekil 1'de verilen buhar sıkıştırırmalı bir soğutma sisteminin teorik olarak termodinamik analizleri yapılmıştır. Bu amaçla EES programı kullanılmıştır.



Şekil 1. Buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin şematik diyagramı

Bu çalışmada incelenen alternatif soğutucu akışkanlar (R454A, R454C, R455A, R457A, R459B) özellikle güvenlik ve çevresel etkiler bakımından değerlendirilerek seçilmişlerdir. Alternatif soğutkan seçiminde GWP değeri en önemli etkenlerden biridir. Bu akışkanların GWP değerlerinin R404A'dan oldukça düşük olması, alternatif soğutkan olarak seçilmelerinde en önemli etken olmuştur. Tablo 1'de bu soğutucu akışkanların özellikleri verilmiştir. Soğutucu akışkanlara ait diğer termodinamik özellikler REFROP yazılımından alınmıştır.

Tablo 1. R404A Alternatifi Olan Soğutucu Akışkanların Özellikleri [13, 14]

Soğutucu akışkan	GWP	Emniyet Sınıfı
R404A	3943	A1
R454A	238	A2L
R454C	146	A2L
R455A	146	A2L
R457A	139	A2L
R459B	143	A2L

Soğutma sisteminin analizinde yapılan kabuller Tablo 2'de görülmektedir. Çevre sıcaklığı 20 °C ve çevre basıncı 1 atm olarak alınmıştır.

Tablo 2. Sistem için yapılan kabuller

Soğutma Yüğü (Q_e)	1 kW
Kondanser Sıcaklığı (T_c)	30°C, 35°C ve 40°C
Evaporatör Sıcaklığı (T_e)	-40°C ile 5°C (her bir 5°C adım için)
Kompresör İzentropik Verimi	0.80
Aşırı Kızdırma Sıcaklığı	7°C
Aşırı Soğutma Sıcaklığı	7°C

Alternatif soğutucu akışkanların kullanıldığı soğutma sisteminin enerji analizinde; kompresör enerji tüketimi (\dot{W}_c), soğutkan debisi (\dot{m}_r), soğutma performans katsayısı (COP) ve ikinci yasa verimi (η_{II}) karşılaştırma parametreleri olarak kullanılmış ve Eşitlikler (1-5) aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_r (h_c - h_g)_e \quad (1)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_r (h_c - h_g)_c \quad (2)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \quad (3)$$

$$\dot{m}_r = (\dot{V} \rho)_{emme_hattı} \quad (4)$$

$$CR = \left(\frac{P_c}{P_g} \right)_{kompresör} \quad (5)$$

T_L ve T_H sıcaklık sınırları arasında çalışan bir soğutma sisteminin en yüksek COP değeri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$COP_{rev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (6)$$

Gerçek bir soğutma sisteminin COP'si her zaman tersinir bir soğutma sisteminin COP'sinden daha düşüktür. Soğutma sisteminin ikinci yasa (ekserji) verimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

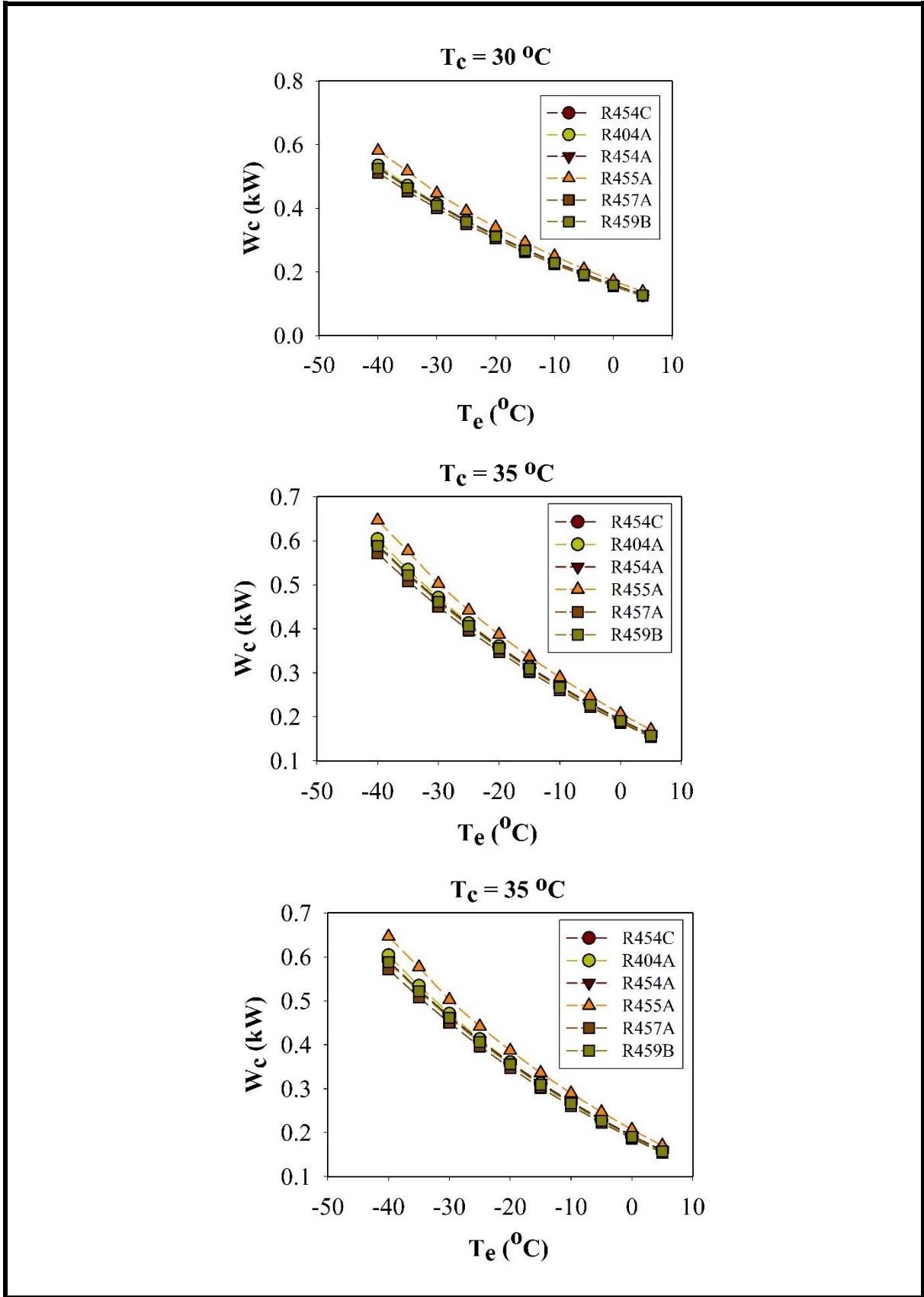
$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} \quad (7)$$

Soğutma sisteminin ekserji yıkımı Eşitlik (8) ile hesaplanabilir [15].

$$\dot{E}x_d = \dot{W}_c - \left[-\dot{Q}_e \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \right] \quad (8)$$

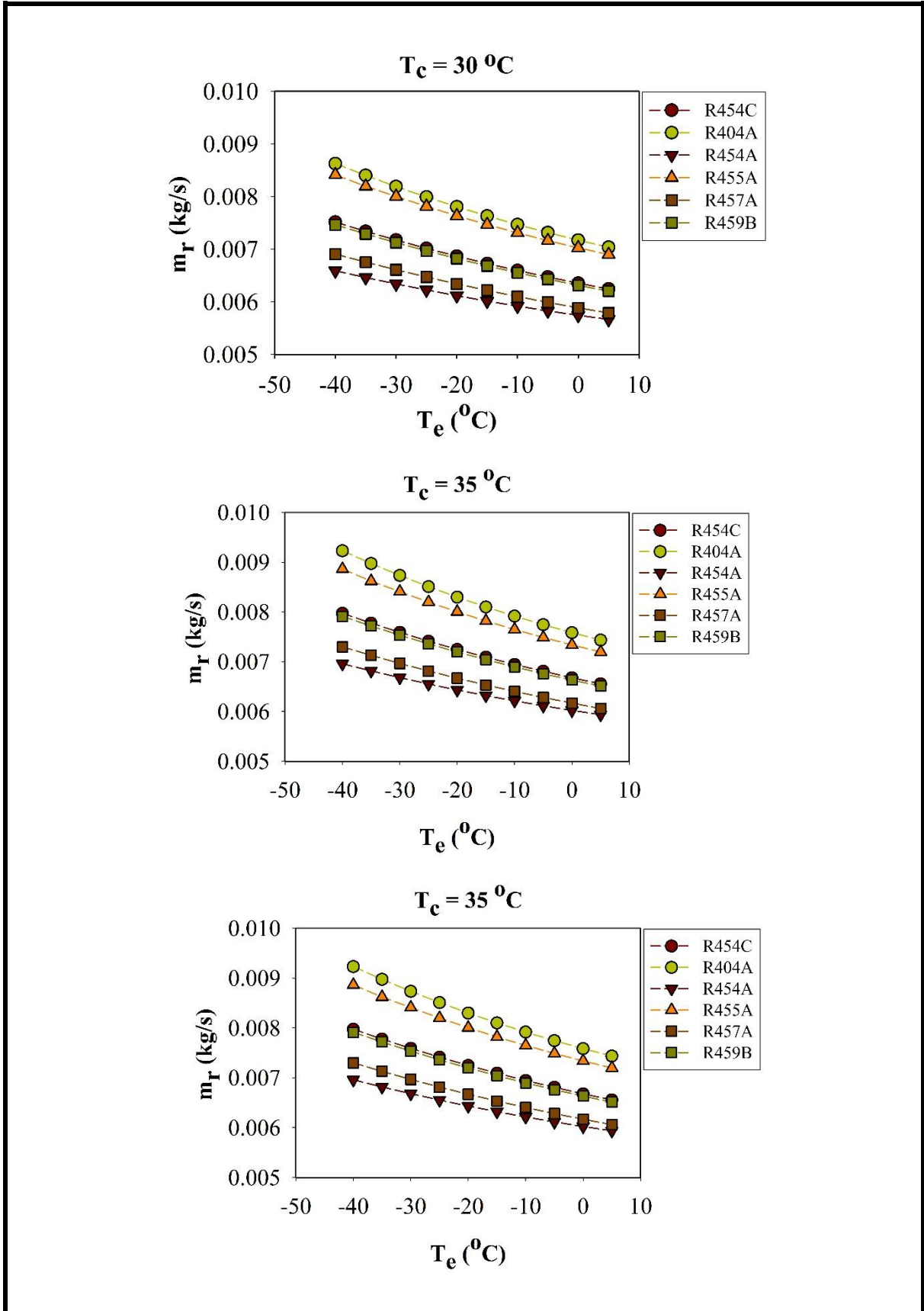
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, R404A'nın alternatifleri olarak GWP'si düşük olan R454A, R454C, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanların kompresör gücü, soğutucu akışkan debisi, COP ve ekserji verimleri incelenmiştir [16]. Şekil 2'de, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların kompresör enerji tüketiminin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla kompresör enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir. En yüksek kompresör enerji tüketimi, R455A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında 0.718 kW olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kompresör enerji tüketimi 0.683 kW olarak bulunmuştur. En düşük kompresör enerji tüketimi ise R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığı için 0.125 kW olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kompresör enerji tüketimi 0.126 kW olarak bulunmuştur.



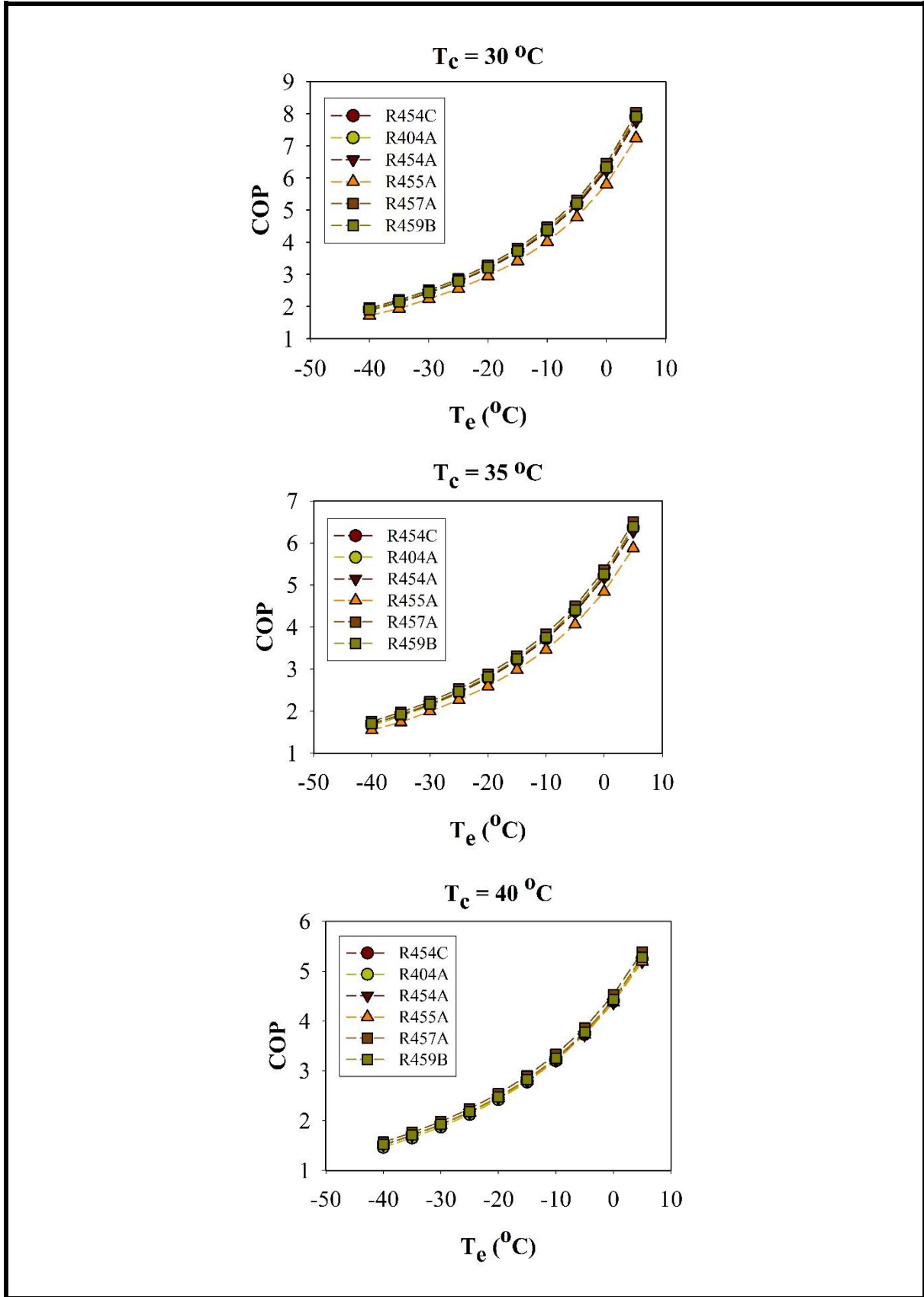
Şekil 2. Kompresör enerji tüketiminin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Şekil 3'te, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların kütleli debilerinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla kütleli debinin azaldığı görülmektedir. En yüksek kütleli debi, R404A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında 0.010 kg/s olarak bulunmuştur. En düşük kütleli debi ise R454A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığı için 0.005 kg/s olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kütleli debi 0.007 kg/s olarak bulunmuştur.



Şekil 3. Soğutucu akışkanların kütleli debilerinin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

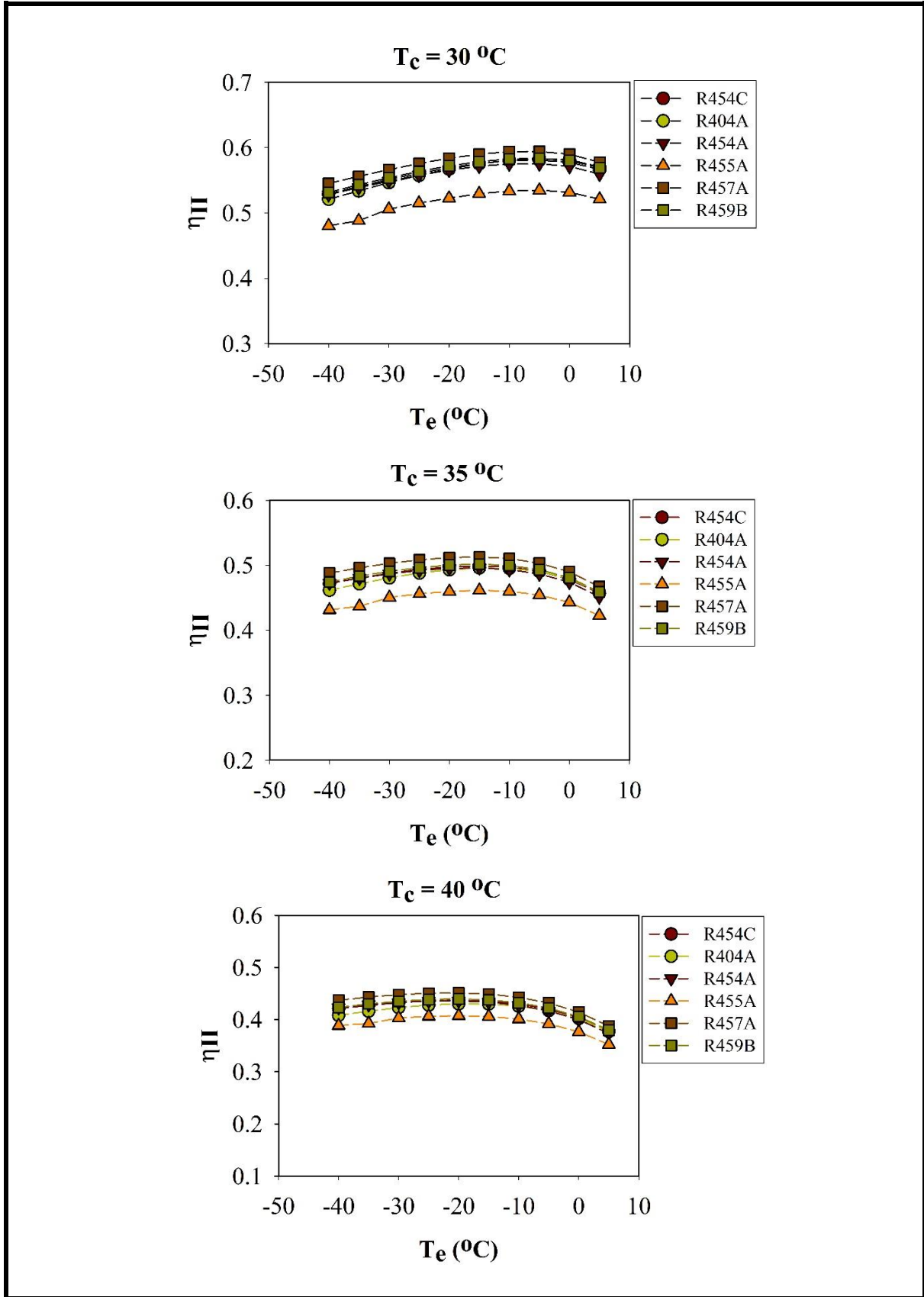
Şekil 4'de, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların COP değerinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla COP değerinin arttığı görülmektedir. En yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde, 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında 8.03 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, COP değeri 7.94 olarak bulunmuştur. En düşük COP değeri ise R455A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığı için 1.39 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde COP değeri ise 1.46 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Soğutucu akışkanların COP değerlerinin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Şekil 5' te, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların ekserji verimliliğinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için kondenser sıcaklığının azalmasıyla ve evaporatör sıcaklığının artmasıyla ekserji veriminin arttığı görülmektedir. Fakat ekserji veriminin

-5°C evaporatör sıcaklığında maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülmektedir. En yüksek ekserji verimi, R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde -5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında 0.59 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.58 olarak bulunmuştur. En düşük ekserji verimi ise R455A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığı için 0.35 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.37 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Soğutucu akışkanların ekserji veriminin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Tablo 3' te, yine aynı çalışma şartlarında (kondenser sıcaklığı 35°C ve evaporatör sıcaklığı -10 °C) tüm soğutucu akışkanlar için elde edilen sonuçların genel bir karşılaştırması görülmektedir. Tablo 3' te görüldüğü gibi

en yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 3.83 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji verimi de yine R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 0.51 olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Tüm soğutucu akışkanlar için elde edilen sonuçların genel bir karşılaştırması

Parametre	R404A	R454C	R454A	R455A	R457A	R459B
\dot{m}_r (kg/s)	0.008	0.007	0.006	0.008	0.006	0.007
\dot{W}_c (kW)	0.27	0.26	0.20	0.20	0.21	0.26
\dot{Q}_c (kW)	1.26	1.26	1.27	1.29	1.26	1.26
COP	3.72	3.74	3.71	3.45	3.83	3.75
CR	3.71	3.83	3.80	3.63	3.87	3.85
Ex_d (kW)	0.36	0.36	0.36	0.38	0.35	0.35
η_{II}	0.49	0.49	0.49	0.46	0.51	0.50

Literatürde R404A soğutucu akışkanına alternatif olan düşük GWP oranına sahip alternatif soğutucu akışkanlar ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazılarının mevcut çalışma ile karşılaştırması yapılarak Tablo 4'te verilmiştir. Genel olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir. Fakat çalışma parametre ve kabullerinin her çalışmada aynı alınmamasından dolayı, elde edilen sonuçların farklı olacağı da aşikârdır. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla bu alternatif soğutucu akışkanlar ayrı ayrı incelendiğinden birbirleriyle aynı çalışma parametrelerinde karşılaştırma imkânı olamamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, bahsedilen alternatif soğutucu akışkanların hepsi aynı çalışma parametrelerinde mukayese edildiğinden en uygun soğutucu akışkanın belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Tablo 4. Mevcut çalışmanın literatürde bulunan çalışmalar ile karşılaştırılması

Yazar(lar)	Yıl	Akışkan	Analizler	Sonuçlar
Yıldırım vd. [8]	2021	R404A R454C	-Enerji -Çevresel etki	<ul style="list-style-type: none">R404A'ya alternatif R454C soğutucu akışkan bir soğutma sisteminde incelenmiştir.Beş farklı evaporatör sıcaklığı (-15°C, -10°C, -5°C, 0°C ve 5°C) ve sabit bir kondenser sıcaklığı (35 °C) için analizler yapılmıştır.Çalışmada, R454C'nin enerji performans (COP) değeri R404A'dan yaklaşık olarak %4 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir.R454C'nin yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) değeri R404A'dan biraz düşük (yaklaşık %3.5) olduğu ifade edilmiştir.Son olarak soğutma sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılması için sadece düşük GWP soğutucu akışkanların kullanılması tek başına yeterli bir kriter olmadığı bunun yanında soğutma sisteminin enerji performansının artırılması ve çevre dostu enerji kaynaklarının kullanılması önerilmiştir.
Li [12]	2017	R404A R452A	-Enerji -Çevresel etki	<ul style="list-style-type: none">Yazar, gıda taşımacılığı soğutma sektörünün yaşam döngüsü iklim performansını kapsamlı bir araştırmasını yapmıştır.Çalışmada R404A soğutucu akışkanına alternatif olarak düşük GWP'li R452A soğutucu akışkanı seçilmiştir.Düşük GWP oranına sahip R452A, R404A ile karşılaştırıldığında %5 ile %15 arasında emisyonların azalmasını sağladığı ifade edilmiştir.
Llopis vd. [7]	2019	R404A R454C R459B R457A R455A	-Enerji	<ul style="list-style-type: none">Çalışma kapsamında ticari bir soğutma sisteminde R404A yerine daha düşük GWP oranına sahip soğutucu akışkanlar (R4554C, R459B ve R457A, R455A) deneysel incelenmiştir.R454C, R459B, R457A, R455A'nın R404'a göre enerji tüketimleri sırasıyla %2.45, %11.55, %10.69, % 2.9 oranında daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.Alternatif soğutucu akışkanların tümünün optimum şarj oranlarının R404A'dan daha düşük olduğu belirtilmiştir.Alternatif soğutucu akışkanların R404A ya göre enerji performansını iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.
Oruç ve Devecioğlu [6]	2021	R404A R454A R454C	-Enerji	<ul style="list-style-type: none">Çalışmada, R404A'ya alternatif olarak daha düşük GWP'ye sahip R454A ve R454C akışkanlarının performansı deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.Çalışmada farklı buharlaşma sıcaklığı (-5°C, 0°C, 5°C) ve farklı kondenser sıcaklığı (30 °C, 40 °C, 50°C) kullanılmıştır.R404A ile karşılaştırıldığında, R454A ve R454C'nin tüm kondenser sıcaklıklarında ölçülen kompresör güç tüketimi sırasıyla %6 ve %15 oranında azaldığı ifade edilmiştir.

				<ul style="list-style-type: none">R454A ve R454C'nin R404A'ya kıyasla COP değerleri incelendiğinde sırasıyla %14 ve %10 daha yüksek olduğu belirtilmiştir.
Bu çalışma	2024	R404A R454A R454C R455A R457A R459B	-Enerji -Ekserji	<ul style="list-style-type: none">On bir farklı evaporatör sıcaklığı (-40 °C, -35°C, -35°C, -30°C, -25°C, -20°C, -15°C, -10°C, -5°C, 0°C, 5°C), üç farklı kondenser sıcaklığı (30°C, 35°C, 40°C), sabit soğutma yükü (1 kW), 0.8 kompresör izantropik verimi ve 7 °C aşırı kızdırma ve aşırı soğutma şartları için R404A'ya alternatif soğutucu akışkanlar bir soğutma sistemi için incelenmiştir.En yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı sahiptir. 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında R457A ve R404A'nın COP değerleri sırasıyla 8.03 ce 7.94'tür.En düşük COP değerine sahip soğutucu akışkan R455A'dır. -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında R455A ve R404A'nın COP değerleri sırasıyla 1.393 ve 1.464'tür.R454C, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarının kompresör enerji tüketimleri R404A'ya göre sırasıyla %2.98, %6.62 ve %3.57 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.R454C, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarının COP değerleri R404A'ya göre sırasıyla %3.07, %7.09 ve %3.7 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30 °C ve evaporatör sıcaklığı -5 °C iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.594 olarak hesaplanmıştır.

IV. SONUÇLAR

GWP değeri düşük olan yeni nesil soğutucu akışkanlarla çalışan sistemlerin R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sisteme göre yakın veya daha yüksek verimlilik sağladığı görülmüştür. Çalışma sonucunda R404A yerine alternatif R454C, R454A, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanlar kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Sistemdeki soğutucu akışkan debileri açısından alternatif soğutkanlar R404A ile karşılaştırıldığında; R454C soğutucu akışkanında %14.48, R454A ve R457A akışkanlarında sırasıyla %34.71 ve %22.11 ve R459B akışkanında %15.19 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Kompresör enerji tüketimi karşılaştırıldığında; R454C soğutucu akışkanında %2.98, R457A ve R459B soğutucu akışkanları için sırasıyla %6.62 ve %3.57 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Sistemin performans katsayılarında R454C soğutucu akışkanında %3.07, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarında sırasıyla %7.09 ve %3.7 oranında artış meydana gelmiştir.
- En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30 °C ve evaporatör sıcaklığı -5 °C iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.59 olarak bulunmuştur.

R404A'nın düşük GWP'li alternatif soğutucu akışkanlarla yer değiştirmesi durumunda soğutma sisteminde daha düşük soğutucu akışkan yükleri, daha az enerji tüketimi ve daha yüksek performans değerleri mümkün olmaktadır. Böylece çalışmada sunulan verilerin ticari öneme sahip olduğu da görülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, enerji ve ekserji verimliliği kriterleri açısından soğutma sistemi tasarımcılarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

COP	Performans katsayısı
CR	Sıkıştırma oranı
\dot{E}_{x_d}	Ekserji yıkımı (kW)
h	Entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
\dot{Q}	Birim zamanda ısı geçişi (kW)

T	Sıcaklık (°C veya K)
\dot{V}	Hacimsel debi (m ³ /s)
\dot{W}	Güç (kW)
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
η_{II}	Ekserji verimi

Alt İndisler

c	Kondenser
C	Kompresör
ç	Çıkan
e	Evaporatör
g	Giren
H	Isı atılan ortam
L	Soğutulan ortam
0	Çevre
r	Soğutucu akışkan
rev	Tersinir

KAYNAKLAR

- [1] The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases. 2006.
- [2] The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EC) 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. 2014.
- [3] Sürerdem, K. (2020). *Çatı tipi klimalarda kullanılan soğutucu akışkanların performans ve çevresel etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Altınkaynak, M. (2021). Exergetic Performance Analysis of HFO Based Refrigerants (R452A, R454C, R455A). *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 245-254.
- [5] Devocioğlu, A. G., & Oruç, V. (2020). Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 27(1), 61-69.
- [6] Oruç, V., & Devocioğlu, A. G. (2021). Experimental investigation on the low-GWP HFC/HFO blends R454A and R454C in a R404A refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 128, 242-251.
- [7] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. (2019). R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: Experimental evaluation and optimization. *International Journal of Refrigeration*, 106, 133-143.
- [8] Yıldırım, R., Kumaş, K., & Akyüz, A. Ö. (2021). Soğutma Sisteminde R404A Yerine R454C Soğutucu Akışkanın Kullanılmasının İncelenmesi: Enerji ve Çevresel Analizi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 11(2), 47-51.
- [9] Ender, S. (2018). *R404a soğutucu akışkanı kullanan sistemlerde R442a ve R453a soğutucu akışkanları kullanılarak sistem verimliliklerinin artırılması*. Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [10] Mendoza-Miranda, J. M., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2016). Evaluation of R448A and R450A as low-GWP alternatives for R404A and R134a using a micro-fin tube evaporator model. *Applied Thermal Engineering*, 98, 330-339.

- [11] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Molés, F., & Verdú, G. (2015). Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 105, 756-762.
- [12] Li, G. (2017). Comprehensive investigation of transport refrigeration life cycle climate performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 33-49.
- [13] Zhang, L., Yang, Z., Zhai, R., Lv, Z., Zhang, Y., & Deng, Q. (2022). Flammable performance and experimental evaluation of a new blend as R404A lower-GWP alternative. *International Journal of Refrigeration*, 135, 113-120.
- [14] Yang, Z., Feng, B., Ma, H., Zhang, L., Duan, C., Liu, B., ... & Yang, Z. (2021). Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 126, 12-22.
- [15] Yıldırım, R., Gungor, A., Akyüz, A., & Tuncer, A. D. (2023). A new approach for environmental analysis of vapor compression refrigeration systems: Environmental impact index. *Thermal Science and Engineering Progress*, 42, 101871.
- [16] Can, S.N. (2023). *Buhar Sıkıştırma Soğutma Sisteminde R404A Alternatifi GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanılmasının Termodinamik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.