



**Makale / Research Paper**

**GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanıldığı Kaskad Soğutma Sisteminin Karşılaştırmalı Performans Analizi**

Erkan DİKMEN\*<sup>1</sup>, Arzu ŞENCAN ŞAHİN<sup>1</sup>, Ömer İslam DEVECİ<sup>2</sup>, Ersin AKDAĞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta/TÜRKİYE,

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, 32260, Isparta/TÜRKİYE, erkandikmen@isparta.edu.tr

Received/Geliş: 07.10.2019

Accepted/Kabul: 25.11.2019

**Öz:** Bazı endüstriyel soğutma uygulamaları için düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyulur. Tek kademeli soğutma sistemleri ile bu sıcaklığı elde etmek oldukça zor ve ekonomik açıdan avantajlı değildir. Bu nedenle daha düşük sıcaklıkta soğutma uygulamalarında kaskad soğutma sistemleri tercih edilir. Bu çalışmada, yeni nesil soğutucu akışkan çiftlerinin kullanıldığı kaskad soğutma sisteminin performans analizi yapılmıştır. Kaskad sisteminde ozon delme potansiyeli (ODP) sıfır olan ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) değeri düşük R454C/ R1234ze, R454C/ R1234yf, R454C/R717, R744/R290 ve R744/R717 soğutucu akışkan çiftleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek COP değerlerine R454C/R717 akışkan çifti kullanıldığında ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaskad soğutma sistem; Düşük GWP soğutkanlar; Performans katsayısı.

**Comparative Performance Analysis of Cascade Refrigeration System Using Low GWP Refrigerants**

**Abstract:** Some industrial cooling applications require low temperatures. With single stage refrigeration systems, it is difficult to obtain this temperature and is not economically advantageous. Therefore, cascade refrigeration systems are preferred for lower temperature cooling applications.

In this study, the performance analysis of the cascade refrigeration system using the new generation of refrigerant pairs was performed. In the cascade system, GWP R454C/ R1234ze, R454C/ R1234yf, R454C/R717, R744/R290 ve R744/R717 refrigerant pairs were used. As a result of analyzes, the highest COP values were reached when the R454C/R717 fluid pair was used.

**Keywords:** Cascade refrigeration system; Low GWP refrigerants; Coefficient of Performance.

**1. Giriş**

Tek kademeli buhar sıkıştırma soğutma sistemleri düşük sıcaklık uygulamaları için pratik değildir. Bu nedenle daha düşük sıcaklık sağlamak ve verimi arttırmak için kaskad sistemleri tercih edilir. Kaskad soğutma sistemi düşük sıcaklık (LTC) ve yüksek sıcaklık çevrimi (HTC) olmak üzere iki çevrimden oluşmaktadır. Bunun yanında bu sistemlerde kullanılan soğutucu akışkan çiftlerinin çevre dostu ve doğaya zarar vermemeleri de önem arz etmektedir [1]. Literatürde kaskad soğutma sistemlerinde çalışılan konular ve kullanılan soğutkanlarla ilgili bazı çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Dikmen, E., Şencan Şahin, A., Deveci, Ö.İ., Akdağ, E., “GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanıldığı Kaskad Soğutma Sisteminin Karşılaştırmalı Performans Analizi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (1); 338-345.

*How to cite this article*

Dikmen, E., Şencan Şahin, A., Deveci, Ö.İ., Akdağ, E., “Comparative Performance Analysis of Cascade Refrigeration System Using Low GWP Refrigerants” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (1); 338-345.

Tablo 1’de görüldüğü gibi farklı soğutkan çiftlerinin kullanıldığı kaskad soğutma sistemi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada sıfır ODP ve düşük GWP değerlerine sahip alternatif soğutucu akışkanlar kullanılarak kaskad soğutma sisteminin performans analizi yapılmıştır.

**Tablo 1.** Kaskad soğutma sistemi ile ilgili yapılan çalışmalar

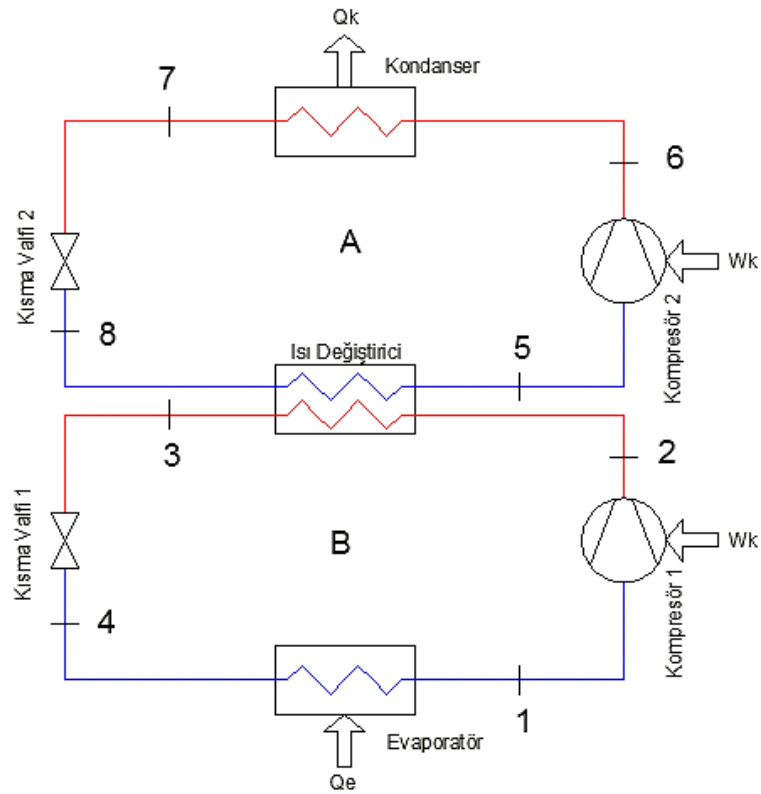
Soğutucu akışkan çiftleri		Çalışılan konular	Yazar
LTC	HTC		
R23	R152a, R290, R507A, R234a, R717, R404A	COP, tersinmezlik	Kilicarslan <i>vd.</i> [2]
R23	R12, R22, R717	COP	Gupta and Parasad [3]
R23	R134a, R290	COP, ekserji verimi	Gami and Aijaz [4]
R23	R507A	COP	Parekh and Tailor [5]
R23	R134, R290, R407C, R404A, R410A	COP, çalışma parametreleri	Kasi [6]
R744	R717	COP, ekserji	Lee <i>vd.</i> [7], Chen <i>vd.</i> [8], Getu and Bansal [9], Bingming <i>vd.</i> [10], Dopazo and Fernández-Seara [11], Fernandez-Seara <i>vd.</i> [12]
R744	R290	COP	Bhattacharyya <i>vd.</i> [13], Bhattacharyya <i>vd.</i> [14]
R744	R1270	COP	Dubey <i>vd.</i> [15]
R744	R404A	Elektrik tüketimi, maliyet	da Silva <i>vd.</i> [16]
R744	R152a, R134a	COP, çalışma parametreleri	Cabello <i>vd.</i> [17]
R744	R134a	COP, çalışma parametreleri	Sánchez <i>vd.</i> [18]
R744	R134a, R404A	COP, çalışma parametreleri	Queiroz <i>vd.</i> [19]
R744	R290, R717	Ekserji verimi	Eini <i>vd.</i> [20]
R744	R134a	COP	Llopis <i>vd.</i> [21]
R744	R717	COP, ekserji verimi	Mosaffa <i>vd.</i> [22]
R744	R744	COP, ekserji verimi	Megdouli <i>vd.</i> [23]
R744	R134a	COP	Sanz-Kock <i>vd.</i> [24]
R170/R744	R290	COP, maliyet	Sholahudin <i>vd.</i> [25]
R290, R170/R744	R290	COP	Nasruddin <i>vd.</i> [26]
R744a	R744	COP	Bhattacharyya <i>vd.</i> [27]
R744a	R134a, R717, R744, R744a	COP	Kruse and Rüssmann. [28], Megdouli <i>vd.</i> [29]
R41	R404A	COP, ekserji verimi	Sun <i>vd.</i> [30]
R508B, R170	R134, R290, R407C, R404A, R410A	COP	Kasi [31]
R744	R404, R290, R1234ze, R152a	COP	Llopis <i>vd.</i> [32]

Sistemin farklı çalışma parametrelerine bağlı olarak performans katsayıları (COP) incelenmiştir. Farklı soğutkan çiftlerinin kullanıldığı kaskad soğutma sisteminin performans değerlendirilmesi EES (Engineering Equation Solver) kullanılarak yapılmıştır [33].

## 2. Kaskad soğutma sisteminin termodinamik analizi

Kaskad soğutma çevrimi Şekil 1’de gösterilmiştir. B çevrimi alçak basınç (LTC), A çevrimi yüksek basınç çevrimini (HTC) göstermektedir.

Alçak basınç (LTC) ve yüksek basınç çevriminde (HTC) kullanılan akışkan çiftleri ve özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Kaskad Soğutma Çevrimi

Termodinamik analizde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Borularda ve sistem elemanlarında ısı kayıpları ve basınç düşümleri ihmal edilmiştir.
- Sistem elemanları sürekli akışlı açık sistem olarak düşünülmüştür.
- Sistemin soğutma kapasitesi 15 kW kabul edilmiştir.
- Çevrimde 1 ve 5 noktaları doymuş buhar, 3 ve 7 noktaları doymuş sıvı kabul edilmiştir.
- HTC ve LTC çevrimlerinde kısılma vanalarında kısılma işleminde entalpi sabittir.
- HTC ve LTC çevrimlerinde kompresörlerde sıkıştırma işlemi izantropiktir.

Tablo 2 Çalışmada kullanılan soğutucu akışkanların bazı özellikleri [33]

Soğutkan	Kaynama sıcaklığı (°C)	Kritik sıcaklık (°C)	Kritik basınç (bar)	ODP	GWP
R-454C	-45.91	82.40	43.50	0	146
LTC R-744	-78.40	31.10	73.17	0	1
R-1234ze	-18.98	108.0	35.39	0	1
HTC R-1234yf	-29.49	94.70	32.69	0	1
R-717	-33.30	132.30	113.30	0	0

Kaskad soğutma sistemi için kütle ve enerji korunumu denklemleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_B \quad (1)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_A \quad (2)$$

Evaporatör gücü:

$$Q_E = \dot{m}_B * (h_1 - h_4) \quad (3)$$

Kondanser gücü:

$$Q_K = \dot{m}_A * (h_7 - h_6) \quad (4)$$

LTC Kompresör gücü:

$$W_{LTC} = \dot{m}_B * (h_2 - h_1) \quad (5)$$

HTC Kompresör gücü:

$$W_{HTC} = \dot{m}_A * (h_6 - h_5) \quad (6)$$

Isı Eşanjörü Enerji Dengesi:

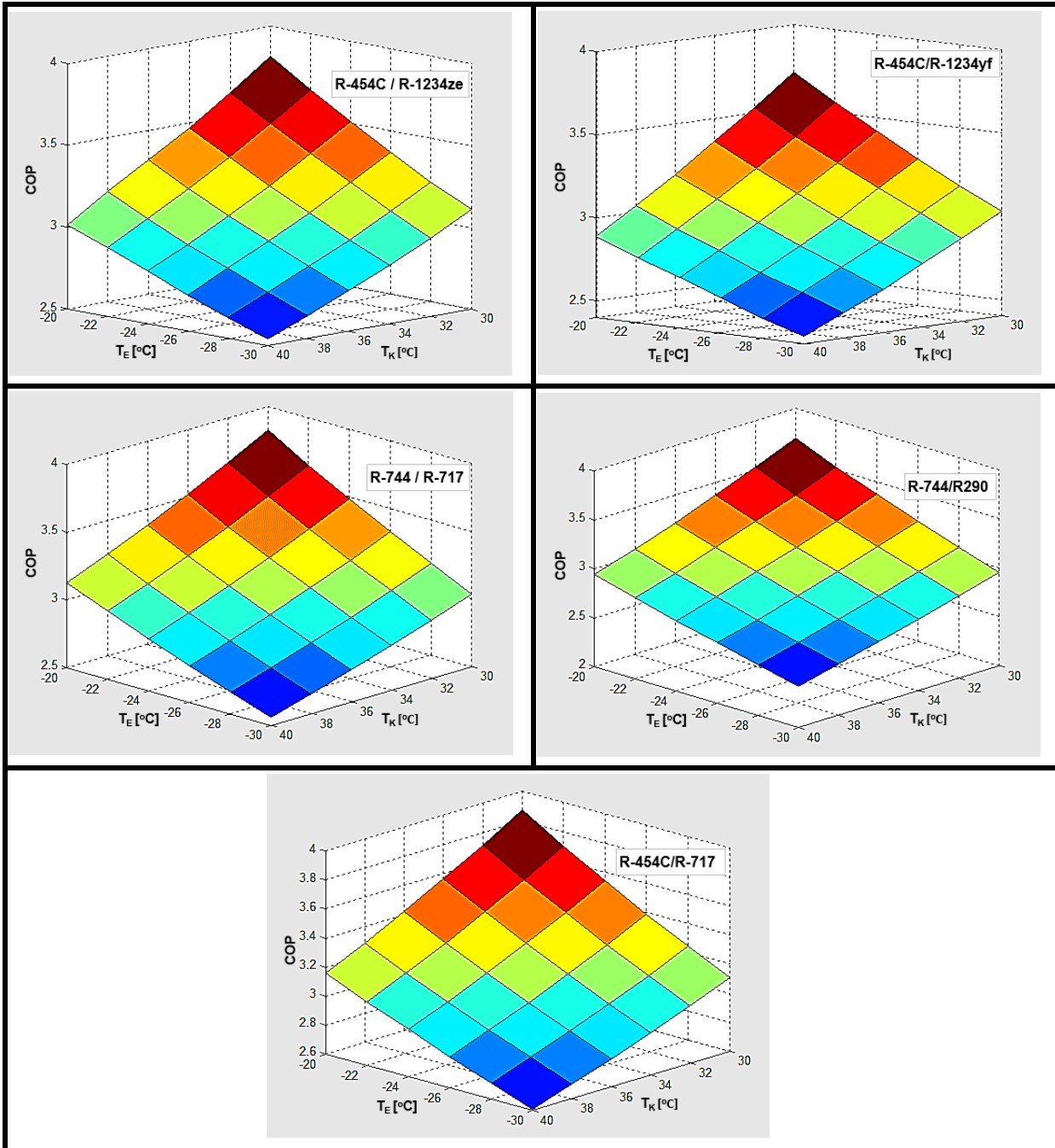
$$\dot{m}_B * (h_2 - h_3) = \dot{m}_A * (h_5 - h_8) \quad (7)$$

Performans Katsayısı (COP):

$$COP = \frac{Q_E}{W_{HTC} + W_{ITC}} \quad (8)$$

### 3. Araştırma Bulguları

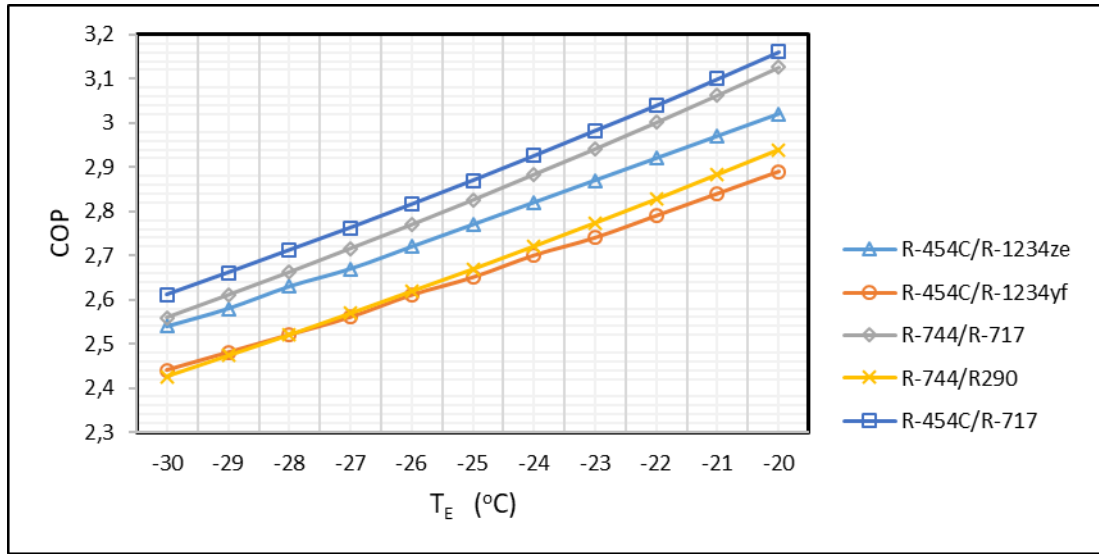
Kondenser ve evaporatör sıcaklıkları kaskad soğutma sisteminin çalışma performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Şekil 2’de ODP değeri sıfır ve GWP değeri düşük olan R454C/R1234ze, R454C/R1234yf, R454C/R717, R744/R290 ve R744/R717 soğutucu akışkan çiftlerinin kullanıldığı kaskad soğutma sisteminde kondenser ve evaporatör sıcaklıklarının değişimleriyle COP değişimleri verilmiştir.



Şekil 2. Farklı soğutkan çiftleri için kondenser ve evaporatör sıcaklıklarıyla COP değişimi

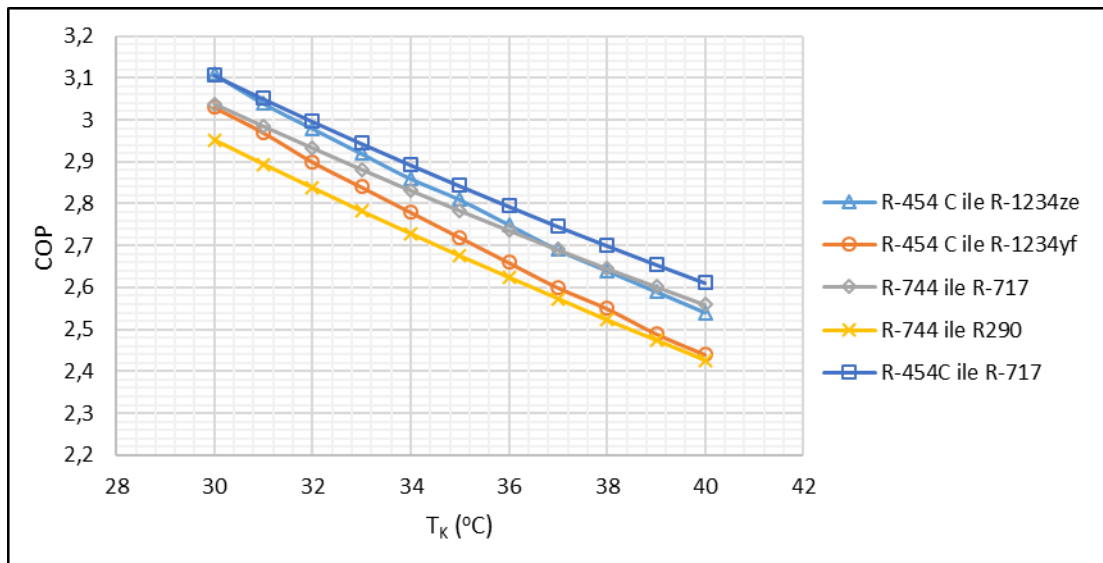
Şekil 2’de, tüm soğutucu akışkan çiftleriyle çalışan kaskad soğutma sisteminde evaporatör sıcaklığının artmasıyla COP değerlerinin arttığı, kondenser sıcaklığının artmasıyla COP değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 3, farklı alternatif soğutucu akışkanların kullanıldığı kaskad soğutma sisteminde evaporatör sıcaklığının COP değerine etkisini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Kondanser sıcaklığı 40 °C’de sabit tutularak alçak basınç çevrimindeki evaporatör sıcaklık değerleri -30°C ile -20°C arasında değiştirilerek COP değerleri hesaplanmıştır. Tüm soğutucu akışkan çiftleri için sistemin COP değeri evaporatör sıcaklığının artmasıyla artmıştır. R454C/R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemin COP değerleri diğer soğutucu akışkan çiftleriyle çalışan sistemin COP değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Evaporatör sıcaklığının COP değerine etkisinin alternatif soğutucu akışkan çiftleri için karşılaştırması

Aynı çalışma parametreleri için en düşük COP değeri, R744/R290 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 2.42 olarak bulunmuştur. En yüksek COP değeri ise R454C/R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 3.16 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Kondenser sıcaklığının COP değerine etkisinin alternatif soğutucu akışkan çiftleri için karşılaştırması

Şekil 4’te farklı soğutkanların kullanıldığı kaskad soğutma sisteminde COP değerlerinin kondenser sıcaklığıyla değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Evaporatör sıcaklığı  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de sabit tutularak kondenser sıcaklık değerleri  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında değiştirilerek COP değerleri hesaplanmıştır.

Tüm soğutucu akışkan çiftleri için sistemin COP değeri kondenser sıcaklığının artmasıyla azalmıştır. R454C/R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemin COP değerleri diğer soğutucu akışkan çiftleriyle çalışan sistemin COP değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı çalışma parametreleri için en düşük COP değeri, R744/R290 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 2.42 olarak bulunmuştur. En yüksek COP değeri ise R454C/R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 3.1 olarak bulunmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Son yıllarda küresel ısınmayı arttıran ve ozonun delinmesini hızlandıran kloroflorokarbonlar (CFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC) ve hidroflorokarbonlar (HFC) gibi maddeler tüm ülkelerde kullanımları kısıtlanmış veya yasaklanmıştır. Bu yüzden son yıllarda yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucu birçok yeni alternatif soğutucu akışkan geliştirilmiştir. Bu yeni soğutucu akışkanların birçoğunun küresel ısınma potansiyeli çok düşük ve ozon delme potansiyeli sıfırdır.

Bu çalışmada ODP değeri sıfır olan ve GWP değeri düşük R454C/ R1234ze, R454C/ R1234yf, R454C/R717, R744/R290 ve R744/R717 soğutucu akışkan çiftleri ile çalışan kaskad soğutma sisteminin karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Analizler EES programı kullanılarak yapılmıştır. LTC çevriminde yoğuşma sıcaklığının ve HTC çevriminde buharlaşma sıcaklığının, kaskad soğutma sisteminin çalışma performansını etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür. LTC çevriminde R454C, HTC çevriminde R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemin COP değerleri diğer soğutucu akışkan çiftleriyle çalışan sistemin COP değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı çalışma parametreleri için en düşük COP değeri, R744/R290 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 2.42 olarak bulunmuştur. En yüksek COP değeri ise R454C/R717 soğutucu akışkan çiftiyle çalışan sistemde 3.16 olarak bulunmuştur.

#### Kaynaklar

- [1]. Sun, Z., Wang, Q., Xie, Z., Liu, S., Su, D., Cui, Q., Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system, *Energy*, 2019, 170, 1170-1180.
- [2]. Kilicarslan, A., Hosoz, M., Energy and irreversibility analysis of a cascade refrigeration system for various refrigerant couples, *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(12), 2947-2954.
- [3]. Gupta, K., Parasad, M., Comparative optimum performance study of multi-stage cascade refrigerating systems, *Mech. Eng. Bull. Heat Recov. Syst.*, 1983, 14(4), 124-130.
- [4]. Gami, H.M., Aijaz, M.A., Thermodynamic analysis of cascade refrigeration system using refrigerants pairs R134a-R23 and R290-R23, *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, 2014, 3(4), 6034-6040.
- [5]. Parekh, A.D., Tailor, P.R., Thermodynamic analysis of R507A-R23 cascade refrigeration system, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 2013, 57, 1919-1923.
- [6]. Kasi, M.P., Simulation of thermodynamic analysis of cascade refrigeration system with alternative refrigerants, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2015, 6(1), 71-91.
- [7]. Lee, T.S., Liu, C.H., Chen T.W., Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in  $\text{CO}_2/\text{NH}_3$  cascade refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(7), 1100-1108.

- [8]. Chen, Y., Han, W., Jin, H., Proposal and analysis of a novel heat-driven absorption-compression refrigeration system at low temperatures, *Applied Energy*, 2017, 185, 2106-2116.
- [9]. Getu, H.M., Bansal, P.K., Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system, *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(1), 45-54.
- [10]. Bingming, W., Huagen, W., Jianfeng, L., Ziwen, X., Experimental investigation on the performance of NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> cascade refrigeration system with twin-screw compressor, *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(6), 1358-1365.
- [11]. Dopazo, J.A., Fernández-Seara, J., Experimental evaluation of a cascade refrigeration system prototype with CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> for freezing process applications, *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(1), 257-267.
- [12]. Fernandez-Seara, J., Sieres, J., Vazquez, M., Compression-absorption cascade refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(5-6), 502-512.
- [13]. Bhattacharyya, S., Mukhopadhyay, S., Kumar, A., Khurana, R.K., Sarkar, J., Optimization of a CO<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> cascade system for refrigeration and heating, *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(8), 1284-1292.
- [14]. Bhattacharyya, S., Bose, S., Sarkar, J., Exergy maximization of cascade refrigeration cycles and its numerical verification for a transcritical CO<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> system, *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(4), 624-632.
- [15]. Dubey, A.M., Kumar, S., Agrawal, G.D., Thermodynamic analysis of a transcritical CO<sub>2</sub>/Propylene (R744-R1270) cascade system for cooling and heating applications, *Energy Conversion and Management*, 2014, 86, 774-783.
- [16]. da Silva, A., Bandarra Filho, E.P., Antunes, A.H.P., Comparison of a R744 cascade refrigeration system with R404A and R22 conventional systems for supermarkets, *Applied Thermal Engineering*, 2012, 41, 30-35.
- [17]. Cabello, R., Sánchez, D., Llopis, R., Catalán, J., Nebot-Andrés, L., Torrella, E., Energy evaluation of R152a as drop in replacement for R134a in cascade refrigeration plants, *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110, 972-984.
- [18]. Sánchez, D., Llopis, R., Cabello, R., Catalán-Gil, J., Nebot-Andrés, L., Conversion of direct to an indirect commercial (HFC134a/CO<sub>2</sub>) cascade refrigeration system: energy impact analysis, *International Journal of Refrigeration*, 2017, 73, 183-199.
- [19]. Queiroz, M.V.A., Panato, V.H., Antunes, A.H.P., Parise, J.A.R., Bandarra Filho, E.P., Experimental comparison of a cascade refrigeration system operating with R744/R134a and R744/R404a, 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference (Purdue Conferences), 2016, 1785-1795, USA.
- [20]. Eini, S., Shahhosseini, H., Delgarm, N., Lee, M., Bahadori, A., Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: exergetic, economic, environmental and inherent safety analysis, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107, 804-817.
- [21]. Llopis, R., Sanz-Kock, C., Cabello, R., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., Effects caused by the internal heat exchanger at the low temperature cycle a cascade refrigeration plant, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103, 1077-1086.
- [22]. Mosaffa, A.H., Farshi, L.G., Infante Ferreira, C.A., Rosen, M.A., Exergoeconomic and environmental analyses of CO<sub>2</sub> /NH<sub>3</sub> cascade refrigeration systems equipped with different types of flash tank intercoolers, *Energy Conversion Management*, 2016, 117, 442-453.
- [23]. Megdoulis, K., Tashtoush, B.M., Nahdi, E., Elakhdar, M., Kairouani, L., Mhimid, A., Thermodynamic analysis of a novel ejector-cascade refrigeration cycles for freezing process applications and air-conditioning, *International Journal of Refrigeration*, 2016, 70, 108-118.
- [24]. Sanz-Kock, C., Llopis, R., Sánchez, D., Cabello, R., Torrella E., Experimental evaluation of a R134a/CO<sub>2</sub> cascade refrigeration plant, *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1), 41-50

- [25]. Sholahudin, S., Giannetti, N., Optimization of a cascade refrigeration system using refrigerant  $C_3H_8$  in high temperature circuits (HTC) and a mixture  $C_2H_6/CO_2$  in low temperature circuits (LTC), *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104, 96-103.
- [26]. Nasruddin, N., Arnas, A., Faqih, A., Giannetti, N., Thermoeconomic optimization cascade refrigeration system using mixed carbon dioxide and hydrocarbons low temperature circuit, *Makara Journal of Technology*, 2016, 20(3), 132-138.
- [27]. Bhattacharyya, S., Garai, A., Sarkar, J., Thermodynamic analysis and optimization of a novel  $N_2O-CO_2$  cascade system for refrigeration and heating, *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(5), 1077-1084.
- [28]. Kruse, H., Rüssmann, H., The natural fluid nitrous oxide as an option as substitute for low temperature synthetic refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(5), 799-806.
- [29]. Megdoui, K., Ejemni, N., Nahdi E., Mhimid, A., Kairouani, L., Thermodynamic analysis of a novel ejector expansion transcritical  $CO_2/N_2O$  cascade refrigeration (NEETCR) system for cooling applications at low temperatures, *Energy*, 2017, 128, 586-600.
- [30]. Sun, Z., Liang, Y., Liu, S., Ji, W., Zang, R., Liang, R., Guo, Z., Comparative analysis of thermodynamic performance of a cascade refrigeration system for refrigerant couples R41/R404A and R23/R404A, *Applied Energy*, 2016, 184, 19-25.
- [31]. Kasi, M.P., Simulation of thermodynamic analysis of cascade refrigeration system with alternative refrigerants. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2015, 6(1), 71-91.
- [32]. Llopis, R., Sánchez, D., Sanz-Kock, C., Cabello, R., Torrella, E., Energy and environmental comparison of two-stage solutions for commercial refrigeration at low temperature: fluids and systems, *Applied Energy*, 2015, 138, 133-42.
- [33]. Engineering Equation Solver (EES) yazılımı, 10.614 Akademik versiyon, 2019.