

GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanlı, İç Isı Değiştiricili Soğutma Sisteminin Modellenmesi

Süleyman ŞİŞMAN

Arş. Gör.
Türk Alman Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği
İstanbul
suleyman.sisman@tau.edu.tr
orcid: 0000-0001-6041-7535

Mehmet İPEKOĞLU

Dr. Öğretim Üyesi
Türk Alman Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği
İstanbul
ipekoglu@tau.edu.tr
orcid: 0000-0002-0019-3346

İ. Cem PARMAKSIZOĞLU

Prof. Dr.
İTÜ (emekli)
İstanbul
parmaksizo@itu.edu.tr
orcid: 0000-0003-0789-9840

ÖZ

Soğutma hem gıdaların güvenliği hem de pandemi sürecindeki örnekleri ile hayatımızın her alanında kitlesel bir büyüklüktedir. Yaygın olarak kullanılan soğutma sistemlerinde kazanılacak ufak bir verim artışı, soğutma makinelerinin sayısı ile çarpıldığında çok ciddi değerlere ulaşmaktadır. Bu çalışmada, iç ısı değiştiricisinin soğutma sistemine etkisi, bu yolla sistemin performansının artışı, düşük Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential, GWP) değeri farklı soğutucu akışkanlar için incelenmiştir. R404A gibi yaygın kullanılan soğutucu akışkanlar düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanların performansları ile kıyaslanmış alternatif düşük GWP'li soğutucu akışkanların performansları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

GWP, Soğutma Sistemi, Modelleme, İç Isı Değiştiricisi, COP.

Modeling of Refrigeration System Using Different Low GWP Refrigerants With Metal Internal Heat Exchanger

ABSTRACT

Refrigeration has a massive scale in all areas of our lives, with examples of both food safety and the pandemic process. A slight increase in efficiency in widely used cooling systems reaches serious values when multiplied by the number of cooling machines. In this study, the effect of internal heat exchangers on the cooling system, thus increasing the system's performance, was investigated for different refrigerants with low GWP values. The performances of alternative low GWP refrigerants were investigated compared to the performances of common refrigerants such as R404A with low GWP refrigerants.

Keywords

GWP, Cooling System, Modeling, Internal Heat Exchanger, COP.

Geliş Tarihi : 27.01.2023
Kabul Tarihi : 05.06.2023

Şişman, S., İpekoğlu, M., Parmaksızoğlu, İ.C., GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanlı, İç Isı Değiştiricili Soğutma Sisteminin Modellenmesi, Tesilat Mühendisliği Dergisi, sayı: 196, sf. 42-48, Mayıs-Haziran 2023.

1. GİRİŞ

İnsanlık 2019 Aralık ayı itibariyle başlayan bir pandemi süreci yaşadı. Bu süreçte ilaçların muhafazası ve taşınması hastalıkla mücadelede en kritik rollerden biri oldu. Soğutma hem gıdaların sağlıklı olarak saklanması, pandemi sürecindeki örnekleri ile sağlıkta, ısıl konforda vb. kısaca hayatımızın ve üretimin her alanında önemlidir. Yaygın olarak kullanılan soğutma sistemlerinde kazanılacak ufak bir verim artışı, soğutma tesisatlarının sayısı ile çarpıldığında çok ciddi değerlere ulaşmaktadır.

Bunun yanında, bir de iklim değişikliği sorununda da soğutucu akışkanlar ciddi bir rol oynamaktadır. Sera gazları, sürdürülebilirlik ve biyolojik çeşitlilikler üzerindeki tahrip edici etkisinin yanında tarım ve hayvancılığı da olumsuz etkilemektedir [1,2]. Sonuç olarak, günümüzün temel sorunları, gıda, enerjinin verimli kullanımı, sağlık, üretim ve sürdürülebilirliğin çözümü için soğutma önemlidir.

Ekim 2016'da Kigali, Ruanda'da HFC soğutucu akışkanlarının düzenlenmesini içerecek şekilde 1987 Montreal Protokolü yenilendi. İhracat yaptığımız Avrupa Birliği'nde, 2030 ve 2050 yılları için HFC soğutucu akışkanlarının kullanımının sınırlandırılmasına dair hedefler belirlenmiştir. Ülkemiz de 2018 yılında F gaz yönetmeliğini yürürlüğe koymuş ve HFC gazları kullanımına sınırlamalar getirmeye başlamıştır [3-5].

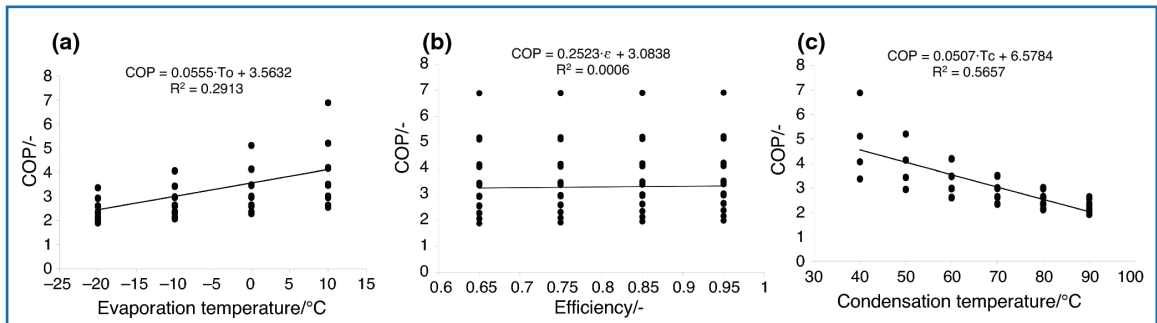
Bu durum karşısında, HFC içeren soğutma sistemlerinin en verimli değerlerde tasarlanıp çalıştırılması, en uygun çalışma noktalarının belirlenmesi, imalat aşamasından önce ısıl modelinin çıkartılması önem arz etmektedir. Ayrıca ısıl modellemeler ile sistem kurulmadan önce soğutucu akışkan seçenekleri incelenmeli, yapılabiliriyorsa HFC soğutucu akışkanlarından vazgeçilmelidir.

Bu çalışmada; açık kaynak kodlu CoolProp yazılımı, PYTHON programını köprü olarak kullanıp, MATLAB programında kullanılabilir hale getirilebilmiştir. Bu sayede soğutma sistemi bilgisayar ortamında programlanabilmiştir. İç ısı değiştiricisinin soğutma sistemindeki verimlilik artışı incelenmiştir. CoolProp kütüphanesinde mevcut soğutucu akışkanlar arasında, GWP değeri düşük soğutucu akışkanlar belirlenmiş ve performansları incelenmiştir.

2. SOĞUTMA SİSTEMİ MODELLEMESİ

En uygun çalışma koşullarının belirlenmesi, uygun soğutucu akışkanın seçimi, soğutma sistemi elemanlarının tespiti için deneysel aşamadan önce modelleme yapmak gün geçtikçe daha önemli hale gelmiştir. Parametrik değişikliklere olanak sağlayan modelleme imkânı ile soğutma sistemlerinin en uygun çalışma noktaları tespit edilebilir. Bu sayede enerji verimliliği artar, soğutucu akışkanların en uygun miktarlarda kullanımı sağlanmış olur. Bu durum hem ekonomik hem de küresel ısınmanın engellenmesi açısından önem arz eder.

Santa [6] tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada iç ısı değiştiricili soğutma çevrimi incelenmiştir. COP değerinin iç ısı değiştiricisi veriminin bir fonksiyonu olduğu varsayılarak, iç ısı değiştiricisinin verimini değişken olarak kullanarak, COP değerine ulaşmayı amaçlamıştır. Çalışmada soğutucu akışkan olarak R134a kullanılmıştır. buharlaştırıcı sıcaklığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri için, yoğunlaştırıcı sıcaklığı, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri için incelemeler yapılmıştır. İç ısı değiştiricisinin yüksek yoğunlaşma ve düşük buharlaşma sıcaklıklarında çok verimli çalıştığı vurgulanmıştır.



Şekil 1. Doğrusal bağıntı katsayıları, a) buharlaşma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak COP, b) verimlilik, c) yoğunlaşma sıcaklığı [6]

Sonuç olarak COP için gerçekleştirilen modelleme sonuçları 25 saatlik deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar ile geliştirilen model arasındaki maksimum hata %7,06 mertebesinde çıkmıştır.

Devecioğlu ve Oruç'un 2022 yılında yaptıkları araştırmada [7] ticari olarak yaygın olarak kullanılan soğutma sistemlerinde Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential -GWP) değeri 150'den düşük olan soğutucu akışkanların yüksek GWP'li R404A'ya alternatif olarak kullanımı incelenmiştir. Çalışmanın temeli süpermarket gibi ticari soğutma sistemlerinde düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanlar kullanılarak enerji incelenmesidir. Teorik model 30 °C ve 40 °C olmak üzere iki sıcaklığı ve -25 °C, -15 °C, -5 °C ve 0 °C olmak üzere dört sıcaklığa dayanmaktadır. Sonuç olarak R454C, R455A, R457A ve R465A kullanılması sonucunda GWP değeri %95 mertebesinde azalmaktadır. Elde edilen COP değerleri R404A'dan daha yüksektir. İncelenen seçenekte oluşturulan soğutucu akışkanların basma basıncı değerleri R404A'dan daha küçük çıkmıştır. Çalışma R454C, R455A ve R457A soğutucu akışkanlarının R404A'ya seçenek olarak kullanılabilirliğini önermektedir.

2019 yılında Babilioni ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [8], düşük GWP'li soğutucu akışkanların kullanıldığı, optimize edilmiş elemanlar içeren en uygun çalışma koşullarında çalışan, kendi özellikleri çerçevesinde çevreye zararı en az olan soğutma çevrimi hedefine ulaşma adına iç ısı değiştiricisinin kullanımı incelenmiştir. İç ısı değiştiricisi içeren soğutma çevrimi R134a, R1234yf, R513A soğutucu akışkanları ile test edilmiştir. İç ısı değiştiricisinin deney sonuçlarında soğutma kapasitesi R513A için %5,6'ya kadar yükselirken, R134a için %3 civarındadır. Yapılan incelemeler sonucunda R513A soğutucu akışkanının iç ısı değiştiricisi ile soğutma çevriminde kullanımı önerilmektedir.

Cao ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada [9], soğutucu olarak CO₂ kullanılan transkritik soğutma çevriminde iç ısı değiştiricisi kullanımının çevrimin alçak basınç tarafındaki basınç değerini düşürmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. IHX kullanımı ile kompresörün emme sıcaklığı ve basma sıcaklığı artmıştır. Su giriş sıcaklığında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Sistemin ekserji incelemesi de yapılmış IHX uy-

gulaması ile toplam ekserji yıkımı arttığı hesaplanmıştır. Deneysel incelemeler neticesinde karbondioksit kullanılan transkritik çevrimin yüksek basınç tarafının iç ısı değiştiricisi kullanarak düşürülebileceği, bu yolla sistemin güvenilirliğinin artırılabilirliği vurgulanmıştır.

2021 yılında Sun ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [10], CO₂ soğutucu akışkanlı bir süpermarket buzdolabının modellemesi yapılmıştır. Süpermarketlerin yıllık enerji tüketimlerinin tahmininde ve fizibilite çalışmalarında modelleme yapmanın önemli olduğu vurgulanmıştır. Model deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında kompresör modeli önerilmiş, diğer soğutma elemanları modellemesi için literatürdeki modeller kullanılmıştır. Benzeşim modeli deneysel sonuçlara kıyasla yüzde dört hata bulunmuştur.

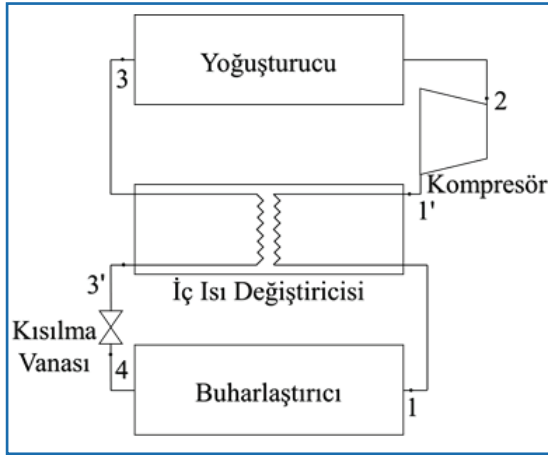
2021 yılında Yu ve arkadaşlarının yaptığı teorik çalışmada [11]; iklimlendirme ve ısı pompası uygulamalarında R404A ile benzer performansı verebilecek soğutucu akışkanlar araştırılmıştır. İncelenen karışımlar GWP, yanıcılık, termodinamik özelliklerden oluşan çok parametrelili optimizasyon işlemi ile incelenmiştir. Elektrikli araçlar için GWP sınırı 150'nin altında belirlendiğinden, 150 GWP değeri ve altı, hafif yanıcılık, maksimum COP amaçları doğrultusunda incelemeler yapılmıştır. R32, R1123, R1311, R161, R152a, R290, R1270, CO₂, R41, R1234ze(E), R1234yf soğutucu akışkanları farklı oranlarda ve kombinasyonlar ile seçilerek 34 adet farklı karışım teorik olarak incelenmiştir. Yanıcılık tahminleri literatürden alınan tahmin yöntemleriyle yine teorik olarak gerçekleştirilmiştir. Soğutma sistemi kurulan entalpi bazlı termodinamik model neticesinde incelenmiştir.

Islam ve arkadaşlarının 2021 yılında on farklı soğutucu akışkan kullanarak yaptıkları çalışmada [12], soğutma çevrimi modellenmiştir. Modelleme entalpi bazlı olup, COP, kütleli debi, emme/basma gaz basıncı, ekserji yıkımı ve ekserji verimi parametreleri üzerinden akışkanlar değerlendirilmiştir. Teorik çalışma sonucunda değerlendirilen akışkanlar arasında CO₂ kullanımı önerilmiştir.

2.1. Modellenen Sistem

İncelenen sistem, iç ısı değiştiricisi içeren buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimidir. Şekil 2'de sunulan çevrimde iç ısı değiştiricisi ile yoğulturucudan çıkan yüksek basınçlı sıcak sıvının enerjisi, buhar-

laştırmacıdan çıkan düşük basınçlı gaza aktarılır. Bu sayede gerçekleşen aşırı soğutma ile buharlaştırıcının soğutma kapasitesi artar. Ayrıca aktarılan ısı enerjisi, buharlaştırıcı çıkışına iletilir, bu sayede kompresörün iş yükü artar. Kompresörün işinin artması enerji açısından istenmese de kompresöre sıvı girişi ihtimalini düşürdüğünden aşırı kızdırma kompresör ömrü açısından istenmektedir. İç ısı değiştiricisi kullanımı ile aşırı soğutma gizli ısı bölgesinden olurken, aşırı kızdırma duyulur ısı bölgesinde olur. Bu sebeple net enerji kazancı, iç ısı değiştiricisi kullanılmayan duruma göre fazladır. Bu durum Şekil 3'de görülebilmektedir. $h'_3 - h_3$ entalpi farkı ile $h_1 - h'_1$ entalpi farkı incelendiğinde aşırı soğutmanın çok daha büyük olduğu görülmektedir.



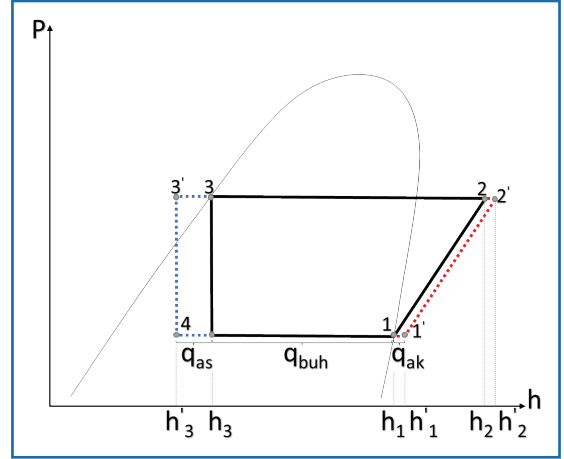
Şekil 2. İç ısı değiştiricili soğutma çevrimi

Aşırı kızdırma ısı; $q_{ak} = h'_1 - h_1$ şeklinde tanımlanır.

Aşırı soğutma ısı; $q_{as} = h'_3 - h_3$ şeklinde tanımlanır.

Kompresör işi; $w_{comp} = h_2 - h'_1$ şeklinde tanımlanır.

Şekil 3'de sunulan grafikte aşırı kızdırma ve aşırı soğutma ısıları basınç entalpi grafiği üzerine meretebe olarak sunulmuştur. İç ısı değiştiricisi olması durumunda performans değerlendirmesi için Soğutma Tesir Katsayısı (COP) yerine Enerji Verimlilik Oranı (EER) kullanımı daha doğru olacaktır. Bu şekilde aşırı kızdırma ve aşırı soğutmanın etkisi de hesaba katılabilir.



Şekil 3. İç ısı değiştiricili soğutma sisteminin basınç entalpi grafiği

COP;

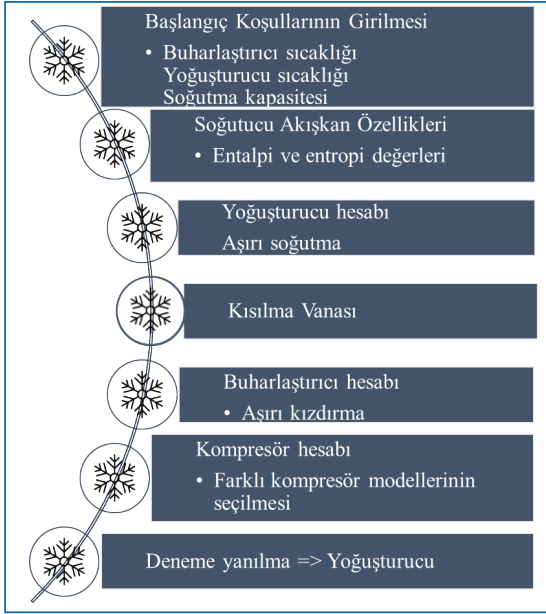
$$\frac{(h_4 - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

EER;

$$\frac{(h'_3 - h_1)}{(h_2 - h'_1)}$$

Soğutma sistemi elemanları yoğuşturucu sıcaklığı, buharlaştırıcı sıcaklığı ve kapasitesi, isentropik kompresör verimi, aşırı kızdırma ve aşırı soğutma dereceleri ile entalpi farkını dikkate alarak modellenmiştir. Soğutucu akışkanların termodinamik özellikleri Bell ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada geliştirdikleri CoolProp yazılımı ile elde edilmiştir [13]. Geliştirilen yazılımın işlem algoritması Şekil 4'te sunulmuştur. Bu hesaplamalar sayesinde seçilen soğutucu akışkan ve soğutma parametreleri için termodinamik hesaplamalar yapılabilmektedir. Farklı kompresör modelleri seçilebilmektedir, iç ısı değiştiricisinin etkisi incelenebilmektedir. Elde edilen kompresör performansı sonuçları yaygın kullanılan soğutma yazılımları gibi ideal durumlar için sonuç vermenin yanında yağlamanın da ekisini dikkate alacak şekilde EN12900 Standardı verilerine uyumlu sonuçlar da sunmaktadır.

İncelenen soğutma sisteminde R404A soğutucu akışkanı yanı sıra düşük GWP değerine sahip R1234yf, R32 ve R600 soğutucu akışkanları da incelenmiştir. İncelenen soğutucu akışkanların GWP ve güvenlik sınıfları Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4. Geliştirilen yazılımın işlem algoritması

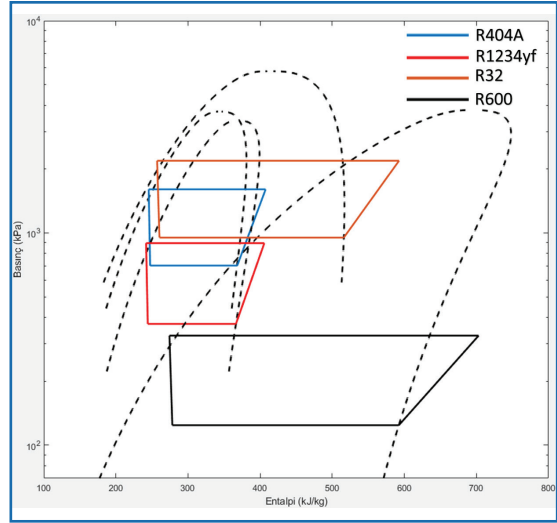
Tablo 1. İncelenen Soğutucu Akışkanların GWP Değerleri ve Güvenlik Sınıfları

	GWP Değeri	Güvenlik Sınıfı
R404A	3922	A1
R1234yf	1<	A2L
R600	4<	A3
R32	677	A2L

İncelenen parametreler; 5 °C buharlaştırıcı sıcaklığı, 35 °C yoğuşturucu sıcaklığı, 10 kW buharlaştırıcı kapasitesi, 0,7 kompresör izentropik verimi, aşırı soğutma derecesi 0-10 K arasında olacak şekilde incelenmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Soğutucu akışkanların 4 K aşırı soğutma altındaki sonuçları içeren basınç entalpi grafiği Şekil 5'te sunulmuştur. Grafikte kritik basınçları en yüksek olan soğutucu akışkanlar R32 ve R600'dür. En yüksek basınç değeri R32'de okunur. R1234yf ile R404A'nın kritik basınçları birbirlerine çok yakındır. Sıcaklık değerlerine bakıldığında, buharlaştırıcı sıcaklığı olan 5 °C'ye ulaşmak için basınç büyüklükleri sırasıyla R32, R404A, R1234yf ve en düşük olarak R600 olmaktadır. Bu açıdan R600'ün

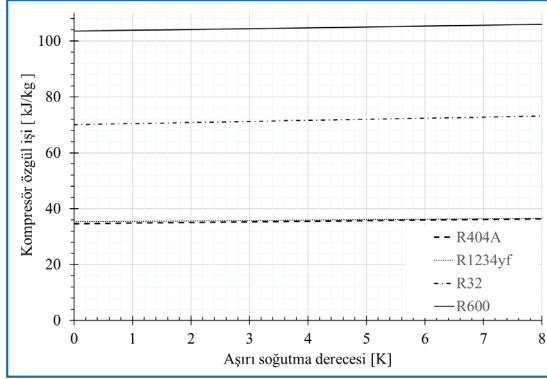


Şekil 5. İncelenen soğutucu akışkanların basınç entalpi diyagramları

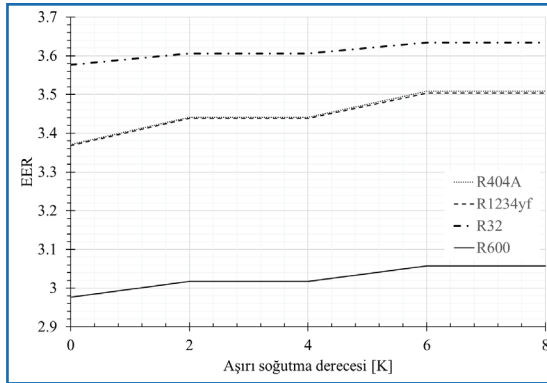
daha düşük basınçlarda çalışması kullanım açısından avantajdır. R404A ile R1234yf'nin sıkıştırma işlemi boyunca çizdikleri eğri birbirlerine yakın eğimdedir. Basınç farkları arası mesafe de benzerdir. Bu açıdan R404A ile R1234yf'nin benzer performans değerine sahip olduğu sonucuna ulaşılabılır.

Aşırı soğutma değerine göre kompresör özgül işlerinin değişimleri Şekil 6'te sunulmuştur. En yüksek iş değeri R600'de görülmektedir. R1234yf ve R404A'nın basınç entalpi diyagramındaki sıkıştırma sürecindeki eğimleri benzer olduğundan, kompresör özgül işleri de birbirlerine çok yakındır. Grafikte üst üste gelmektedir. Aşırı soğutma derecesi arttığından aşırı kızdırma da ona bağlı olarak artacaktır. Bu sebeple kompresör işinin artması beklendiği gibi gerçekleşmiştir. Bu artışın eğimi aşırı soğutma ile kazanılan enerji miktarı ile kıyaslanınca düşük kalmaktadır. Aşırı kızdırma temelde kompresöre sıvı girişini engellediği için tercih edilmektedir.

Aşırı soğutma derecesine göre EER'nin değişimi Şekil 7'deki gibidir. En yüksek performans değeri R32 tarafından sağlanmaktadır. R404A ve R1234yf ise daha düşük değerdedirler. Buna rağmen fark 0,2 mertebesinde. Ancak R600 ise diğer üç soğutucu akışkandan daha düşük performans vermektedir.



Şekil 6. Aşırı soğutma derecesine göre kompresör özgül işi değişimi



Şekil 7. Aşırı soğutma derecesine göre EER'nin değişimi

SONUÇ

İç ısı değiştiricisi olan soğutma çevriminde aşırı soğutma sonucunda buharlaştırıcı kapasitesi artar, bu performansı artırır. Aşırı kızdırma etkisi ile de kompresör işi artmaktadır. Bu durumun da performans değerini düşürmesi beklenmektedir.

Bu çalışmada düşük GWP değeri olan soğutucu akışkanlar R1234yf, R32 ve R600 için termodinamik özellikleri elde edilmiştir. Bu veriler R404A ile kıyas edilmiştir. Aşırı soğutma derecesine göre kompresör özgül işi ve EER değerleri incelenmiştir.

Yapılan incelemeler neticesinde;

- R1234yf, R404A'ya en yakın performansı veren soğutucu akışkandır. Kritik basınçları, sıkıştırma aşamasında çizdikleri eğrinin eğimi birbirlerine çok yakındır.
- En yüksek kritik basınç ve çalışma basıncı değerleri R32 soğutucu akışkanında elde edilmiştir.

- GWP değeri R32'nin 667 mertebesinde iken, R1234yf'nin 1'den düşüktür.
- İncelenen soğutucu akışkanlar arasında en yüksek EER değerini R32 vermektedir. Bu değer R1234yf'den çok büyük değildir.
- R1234yf soğutucu akışkanı da R404A ile birbirlerine çok yakın sonuçları vermektedir.
- R32 ve R1234yf akışkanları A2L güvenlik sınıfındadır. Bu açıdan A1 sınıfında olan R404A'dan daha geri durumdadır.
- Tüm değerlendirmeler ışığında R404A soğutucu akışkanlı sistemlerde yangın ve diğer sakıncaları açısından tedbirler alınmak kaydıyla incelenen soğutucu akışkan seçeneklerine geçiş ile GWP değeri düşürülebilmektedir.

SİMGELER

h	Entalpi, [kJ/kg]
q	Isı, [kJ/kg]
w	İş, [kJ/kg]
T	Sıcaklık [°C]

Alt Simgeler

ak	Aşırı kızdırma
as	Aşırı soğutma
$comp$	Kompresör

KISALTMALAR

COP	Coefficient of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
GWP	Global Warming Potential

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Türkiye'nin Yedinci Ulusal Bildirimi", p. 266, 2018.
- [2] Orman Genel Müdürlüğü, "İklim Değişikliği Sürecinde Orman Yangınları Çalıştay Raporu", 2016.
- [3] ASHRAE, 2018 Ashrae Handbook, 2018.
- [4] European Parliament, "Directive 2018/2002/EU amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency", 2018.
- [5] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Florlu Sera Gazlarına İlişkin Yönetmelik, 2018, pp. 1–6.
- [6] R. Sánta, "Investigations of the Performance of a Heat Pump With Internal Heat Exchanger", J. Therm. Anal. Calorim., vol. 147, no. 15, pp. 8499–8508, 2022.
- [7] A. G. Devocioğlu and V. Oruç, "Drop-in As-

- essment of Plug-In R404A Refrigeration Equipment Using Low-Global Warming Potential Mixtures”, *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, no. 10, pp. 991–999, 2022.
- [8] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbrí, V. Pascual-Mirallas, Á. Barragán-Cervera, and A. Maiorino, “Experimental Influence of an Internal Heat Exchanger (IHx) Using R513A and R134a in a Vapor Compression System”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, pp. 482–491, 2019.
- [9] F. Cao, Z. Ye, and Y. Wang, “Experimental Investigation on the Influence of Internal Heat Exchanger in a Transcritical CO₂ Heat Pump Water Heater”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 168, no. December 2019, p. 114855, 2020.
- [10] J. Sun, T. Kuruganti, J. Munk, J. Dong, and B. Cui, “Low Global Warming Potential (GWP) Refrigerant Supermarket Refrigeration System Modeling and its Application”, *Int. J. Refriger.*, vol. 126, pp. 195–209, 2021.
- [11] B. Yu, H. Ouyang, J. Shi, W. Liu, and J. Chen, “Evaluation of low-GWP and Mildly Flammable Mixtures as New Alternatives for R410A in Air-Conditioning and Heat Pump System”, *Int. J. Refriger.*, vol. 121, pp. 95–104, 2021.
- [12] M. A. Islam, S. Mitra, K. Thu, and B. B. Saha, “Study on Thermodynamic and Environmental Effects of Vapor Compression Refrigeration System Employing First to Next-Generation Popular Refrigerants”, *Int. J. Refriger.*, vol. 131, no. May, pp. 568–580, 2021.
- [13] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, “Pure and Pseudo-Pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library Coolprop”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, 2014.