



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Soğutma sistemlerinde R454C kullanılımasının deneysel incelenmesi

Experimental investigation for the use of R454C in refrigeration systems

Yazar(lar) (Author(s)): Atilla G. DEVECİOĞLU¹, Vedat ORUÇ²

ORCID¹: 0000-0001-9174-378X

ORCID²: 0000-0001-9055-1508

To cite to this article: Devocioğlu A.G., Oruç V., “Soğutma sistemlerinde R454C kullanılımasının deneysel incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(1): 153-160, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Devocioğlu A.G., Oruç V., “Soğutma sistemlerinde R454C kullanılımasının deneysel incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(1): 153-160, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.898828

Soğutma Sistemlerinde R454C Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi

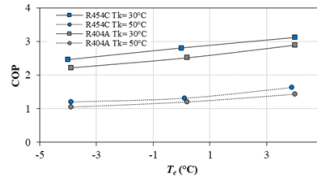
Experimental Investigation for the Use of R454C in Refrigeration Systems

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ R404A ile HFC/HFO karışımı R454C mukayese edilmiştir / R404A is compared with HFC/HFO mixture of R454C.
- ❖ R454C'nin COP değerleri R404A'dan ortalama %10 daha yüksek tespit edilmiştir. / COP of R454C is determined higher than R404A about by 10%.
- ❖ R454C kullanılmasıyla önemli miktarda CO₂ emisyonu azaltulabilir. / CO₂ emission can be reduced substantially using R454C.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

R454C'nin COP değerleri R404A'dan yüksek bulunmuştur. R454C'nin daha iyi bir enerji performansı göstermesinin yanı sıra çevre dostu bir soğutucu akışkan olduğu tespit edilmiştir. / COP of R454C has been obtained higher than R404A. It has been determined that R454C demonstrated a better energy performance as well as it is an eco-friendly refrigerant.



Şekil COP'nin T_e ile değişimi / Figure The variation of COP with T_e

Amaç (Aim)

R454C soğutucu akışkanının soğutma sistemlerinde kullanılmasının, enerji performansı ve çevre üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. / It is the investigation for the effect on the energetic and environmental impacts using R454C refrigerant in refrigeration systems

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Oluşturulan deney seti ile farklı buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıkları için sistemin termodinamik performansı belirlenmiştir. / The thermodynamic performance of the system was assessed via the installed experimental set-up for different evaporation and condenser temperatures.

Özgünlük (Originality)

Kullanılan sistem ve sıcaklıklar daha önce R454C için araştırılmamıştır. R454C için TEWI ve karbon emisyon değerlendirilme analizi ilk kez tartışılmıştır. / The utilised system and the considered temperatures were not investigated previously for R454C. The evaluation of TEWI and Carbon emission analysis for R454C is discussed for the first time.

Bulgular (Findings)

R454C'nin enerji performansı ve çevresel etki değerleri R404A'dan daha iyidir. / The energy performance and environmental impacts of R454C are more favourable than R404A.

Sonuç (Conclusion)

R404A yerine R454C kullanılmasıyla soğutma sisteminin enerji performansı iyileştirilmiştir. / The energetic performance of the refrigeration system is improved using R454C as a substitute for R404A.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Soğutma Sistemlerinde R454C Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Atilla G. DEVECİOĞLU^{1*}, Vedat ORUÇ¹

¹Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

(Geliş/Received : 17.03.2021 ; Kabul/Accepted : 27.09.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 18.10.2021)

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, yüksek GWP değerine sahip R404A soğutucu akışkanını yerine hidrofloroolefin/hidroflorokarbon (HFO/HFC) karışımı düşük GWP değerine sahip R454C soğutucu akışkanının kullanılmasının incelenmesidir. Deneysel çalışmada iki farklı buharlaşma sıcaklığı (-4°C ve $+4^{\circ}\text{C}$) ve iki farklı yoğunlaşma sıcaklığı (30°C ve 50°C) kullanılmıştır. Her iki kondenser sıcaklığında R404A'nın elektrik tüketimi R454C'den yüksek tespit edilmiştir. Ayrıca R454C'nin COP değeri R404A'dan ortalama %10 fazla tespit edilmiştir. R454C'nin kullanılmasıyla, sistemde dolaşan kütleli debi değerinde azalma olmuştur. R454C'nin güç tüketimi R404A'dan ortalama %15 daha düşüktür. Alternatif karışımın kompresör çıkış sıcaklıkları R404A'dan yüksek olmakla birlikte R454C'nin çalışma koşulları için uygun olduğu görülmüştür. Hesaplanan TEWI değeriyle, R454C kullanılmasıyla CO₂ emisyonlarında önemli azalmalar olmuştur. R454C'nin ekserji verimi R404A'dan yaklaşık %10-%15 daha yüksek bulunmuştur. Sistemde hiçbir değişiklik yapılmadan R404A'ya alternatif olarak R454C kullanılması mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: HFC/HFO karışımı, R454C, düşük-GWP, TEWI, karbon ayak izi.

Experimental Investigation for the Use of R454C in Refrigeration Systems

ABSTRACT

The aim of this study is investigation of using hydrofluoroolefin/hydrofluorocarbon (HFO/HFC) mixture of R454C with low-GWP as a substitute for R404A with high GWP. In the experimental study, two different evaporation temperatures (-4°C , $+4^{\circ}\text{C}$) and two different condenser temperatures (30°C , 50°C) cases were investigated. The power consumption of R404A was determined to be greater compared to R454C for both condenser temperatures. Moreover, COP of R454C was seen to be higher than R404A about by 10%. The mass flow rate of refrigerant circulating in the system was reduced using R454C. The power consumption of R454C was about 15% lower than R404A. Although the discharge temperature of compressor for the alternative refrigerant was greater than R404A, R454C is verified to be suitable for the operating conditions. TEWI computations indicates that CO₂ emissions are reduced substantially using R454C. The exergy efficiency of R454C was found to be approximately 10-15% higher than R404A. It will be possible to use R454C as an alternative for R404A without performing any modification in the system.

Keywords: HFC/HFO mixture, R454C, low-GWP, TEWI, carbon footprint.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Soğutucu akışkanlardan kaynaklanan ozon tabakasının incelenmesinin önüne geçilmesiyle (IPCC, 2005) ikinci tehlike sera gazı ve küresel ısınma riski artmaya başlamıştır (Calm, 2008). Soğutucu gazların sera gazı ve küresel ısınma gibi çevre üzerindeki direkt etkisi büyük oranda Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerlerinin büyüklüğüne bağlıdır. Hidroflorokarbon (HFC) türevi soğutucu akışkanların sera gazına katkısı %2'lerde iken kontrol edilmemesi durumunda gelecek otuz yılda on katına kadar çıkabileceği öngörülmektedir (Yang vd., 2019). Bu kapsamda en önemli adım Montreal Protokolünü'ne ek olarak Kigali Değişikliği ile atıldı. Buna göre gelişmekte olan ülkelerin 2024-2028 yılları arasında HFC kullanımını dondurarak takip etmeleri önerilmiştir (UNIDO, 2017). AB'de, F-Gaz Düzenlemesi ile (Regulation EU No 517, 2014), 01/01/2022'den itibaren, küçük kapasiteli hermetik yapıda

soğutucu/dondurucular için sadece GWP değeri 150'den küçük olan soğutucu akışkanların kullanılmasına izin verilmiştir.

Ticari soğutma sektörü dünya HFC kullanımının yaklaşık 1/3'ünü içermektedir. Ticari soğutmada özellikle süpermarket soğutma sistemlerinde ağırlıklı olarak R404A soğutucu akışkanını yaygın olarak kullanılmaktadır (Mota-Babiloni vd. 2015a; Llopis vd. 2019). Yüksek GWP değerine sahip R404A kullanımı ile soğutma sistemlerinin çevreye vermiş olduğu hem dolaylı hem de doğrudan olumsuz etkiler artmaktadır.

GWP değeri küçük olan soğutucu akışkanlardan hidrokarbon (HC) türevi olanlar ASHRAE güvenlik sınıfı 3 olarak aşırı yanıcıdır (ASHRAE, 2016) ve şarj miktarları kısıtlıdır. HFC türevi olanların GWP değerleri yüksektir. Dördüncü nesil olarak adlandırılan hidrofloroolefin (HFO) türevi soğutucu akışkanların da GWP değerleri ancak hafif yanıcı olarak tanımlanmıştır. Hem düşük GWP'li, hem hafif yanıcı/yanıcı olmayan hem de enerji değerleri yüksek karışım araştırmaları artmıştır. Bu yüzden HFC/HFO tipi karışım gazlarının kullanımı iyi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : atillad@dicle.edu.tr.tr

bir alternatiftir.HFC/HFO karışımlarında, HFC olarak R32 veya R134a kullanılırken, HFO olarak R1234yf ve R1234ze kullanılmaktadır. GWP değerleri ve yanıcılık sınıflandırması karışımdaki akışkanların oranlarına bağlıdır. HFC/HFO karışımı ve A1 güvenlik sınıfı olan soğutucu akışkanlarla yapılan çalışmalarda (Mota-Babiloni vd., 2015b; Makhnatch vd., 2017) ve HFC'lerin karışımından yapılan çalışmalarda (Oruç vd., 2018) GWP değerlerinin 1000'in üzerinde olduğu ve bu anlamda uzun vadede ümit vadetmediği söylenmiştir.

Ev tipi soğutma sistemleri için R134a ile yeni karışım R513A'nın mukayesesi yapılmıştır (Yang vd., 2019). R513A'nın 24 saatlik enerji tüketimi R134a'dan %3.5 daha düşük bulunmuştur. Sıcak iklimler için R404A'ya alternatif olarak R454C ve R455A'nın deneysel mukayesesi yapılmıştır (Mota-Babiloni vd. 2018). Deneysel sonuçlarda, soğutma kapasitesi, R404A'nınkinden çok az küçük çıkarken, Performans Katsayısı (COP) değeri % 10-15 daha yüksek bulunmuştur. Llopis vd. (2019) R404A ile R454C ve diğer üç düşük GWP değerli soğutucu akışkanı mukayese etmişlerdir. R454C kullanılması durumunda enerji tüketiminde optimum soğutucu şarj miktarının da R404A'ya göre daha az olduğu belirtilmiştir. Heredia-Aricapa vd. (2020) tarafından yapılan teorik çalışmada R454A ve R454C'nin hacimsel soğutma kapasitesi R404A'dan düşük tespit edilmiştir. Her iki soğutucu akışkanın ASHRAE sınıfı A2L olarak teyit edilmiştir. (Llopis vd., 2020) R454C'nin TEWI analizindeki direkt emisyon değerlerini R459B, R457A ve R455A'dan daha düşük tespit etmişlerdir.

Literatürde R404A ile düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanların mukayesesinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur. R404A'nın yerine R448A ve R455A kullanıldığı çalışma (Sethi vd. 2016), R449A'nın kullanıldığı çalışma (Makhnatch vd. 2017), R452A'nın kullanıldığı çalışma (Li, 2017; Devocioğlu ve Oruç, 2021), R442A ve R453A'nın kullanıldığı çalışmalar (Oruç vd. 2018) bulunmaktadır.

Bu çalışmada, R404A ile çalışan bir soğutma sisteminde, R454C'nin enerji performansının farklı yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı sıcaklıkları için deneysel olarak mukayesesi amaçlanmıştır. GWP değeri 146 olan alternatif soğutucu akışkan R454C, R32/R1234yf karışımdır. GWP değeri 150'den düşük olan soğutucu akışkanların tercih edildiği yerlerdeki cihazlarda kullanılabilirlerdir.

2. R404A ve R454C SOĞUTUCU AKIŞKANLARI (R404A and R454C REFRIGERANTS)

R404A soğutucu akışkanı HFC türevi bir karışımdır. Deneysel sisteminin kompresör ve genleşme valfi R404A için üretilmiştir. Çalışmanın amaçlarından biri olan R404A soğutucu akışkanı yerine sisteme alternatif soğutucu akışkanlar şarj edilerek doğrudan çalıştırılmasıdır. Alternatif soğutucu akışkan R454C bu kapsamda sistemde yapısal değişiklik yapılmasına gerek kalmadan kullanılabilir. Soğutucu akışkanların, bazı özelliklerini karşılaştırmak için Tablo 1 verilmiştir.

Soğutucu akışkanların nasıl davranacağını tahmin etmek için bu özellikler kullanılabilir. Gazların termodinamik ve transport özellikleri REFPROP yazılımı (Lemmon vd., 2017) kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. R404A ve R454C soğutucu akışkanlarının bazı özellikleri (Some characteristics of R404A and R454C refrigerants)

	R404A	R454C
Bileşenler	R125/R134a/R143a	R32/R1234yf
Kütle oranı (%)	44/4/52	21.5/78.5
Kaynama noktası (1 atm) (°C)	-47	-45.5
Kritik sıcaklık (°C)	72.0	82.4
Kritik basınç (kPa)	3734	4319
Sıvı yoğunluğu (kg m ⁻³)	1044.1	1042.4
Buhar yoğunluğu (kg m ⁻³)	65.3	44.5
k sıvı (mW m ⁻¹ K ⁻¹)	62.7	75.6
k buhar (mW m ⁻¹ K ⁻¹)	17.0	14.4
Gizli ısı (kJ kg ⁻¹) [*]	200.9	227.3
Sıcaklık kayması (K)	0.5	6
GWP (AR5)	3943	146
ASHRAE güvenlik sınıfı	A1	A2L

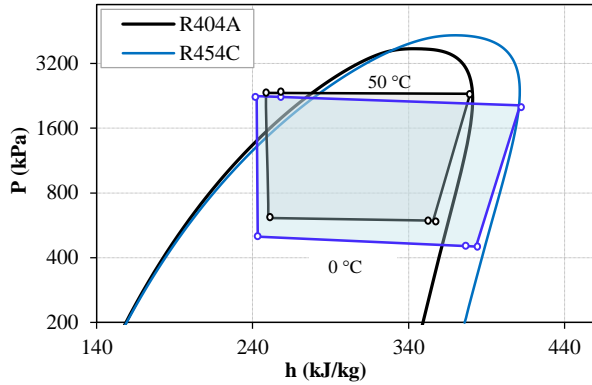
^{*}25°C deki değerler, ^{*} 101.3 kPa'da

Alternatif soğutucu akışkan R454C, HFC/HFO (R32/R1234yf) karışımdır. Yapısındaki her iki saf soğutucu akışkan da ASHRAE tarafından hafif yanıcı olarak sınıflandırılmıştır. R454C'nin yanıcılık kategorisi 2L olarak belirlenmiştir. R454C'nin en önemli özelliği GWP değerlerinin 146 olması yani R404A'dan, yaklaşık %95 daha düşük olmasıdır. Bu sayede, GWP değeri 150'den küçük olması gereken küçük ticari soğutma sistemlerinde kullanılması mümkündür.

R454C'nin kaynama noktası -45°C'den küçüktür. Bu sayede daha önceden R404A için tasarlanmış sistemlerde düşük ve orta sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir. R454C'nin kritik sıcaklık değerleri R404A'dan yaklaşık %9 daha yüksektir. Bu sayede kompresörün güç tüketiminin azalması beklenir. Dahası yüksek kritik sıcaklık, yüksek dış ortam sıcaklıklarında (sıcak iklimler) daha iyi performans gösterir. R454C'nin kritik basınç değeri R404A'dan fazladır. Buhar yoğunluğunun artması kompresör elektrik tüketiminde azalmaya neden olmaktadır. Buhar yoğunluğunun düşük olmasından dolayı, aynı hacimsel debi için, kütleli debi azalacaktır. Düşük sıvı yoğunluğu sisteme daha az soğutucu akışkan şarjı gerektirir. Yüksek ısı iletim katsayısı, aynı kütleli debi için daha fazla ısı transferi anlamına gelir. Isıl iletkenliğin yüksek olması R404A için hesaplanan ısı transfer alanının, R454C kullanıldığı zaman daha fazla olacağı anlamına gelir. Tüm karışım soğutucu akışkanlarda olduğu gibi, alternatifler karışımlarda da sıcaklık kayması meydana gelmektedir. Sıcaklık kayması faz değişiminin meydana geldiği kondenser ve evapoartörde toplam ısı transfer katsayısını azaltan bir etkiye sahiptir.

R404A ve R454C'nin basınç-entalpi sıvı doyma eğrisinin benzer özellik gösterdiği Şekil 1'de görülebilir. R404A'nın kritik noktası R454C'den daha düşüktür. Şekil 1'de 0°C evaporatör ve 50°C kondenser sıcaklıkları

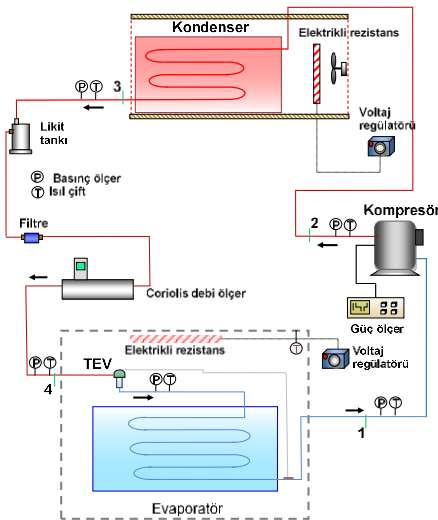
için soğutucu akışkanların sabit sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 1. Test edilen soğutucu akışkanların basınç-entalpi diyagramı (Pressure-enthalpy diagram of the refrigerants tested)

3. DENEY DÜZENEGİ ve DENEYLER (EXPERIMENTAL SETUP and EXPERIMENTS)

Deney setinin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Burada sistemin temel elemanları ölçüm araçları ve yerleri gösterilmiştir. Sistemde 1 beygir gücünde pistonlu kompresör, bakır boru alüminyum kanatlı havadan havaya ısı aktaran evaporatör ve kondenser bulunmaktadır. Sistem, R404A için boyutlandırılmış termostatik genişleme vanası, likit tankı, filtre, düşük/yüksek basınç otomatığı ve elektrik kontrol panelinden oluşmaktadır. Bileşenleri birbirine bağlayan bakır borular kauçuk köpüğü izolasyonu ile kaplanmıştır. Kompresör süpürme hacmi 20.73 cm³’tür. Kompresör mono faz 220V, 50 Hz’de çalışmaktadır. Evaporatör ve genişleme vanası, izole edilmiş bir soğuk oda içerisinde bulunmaktadır. Bu hacimde bulunan 3000 W’lık elektrikli rezistanslar bir varyak yardımı ile kontrol edilerek iç ortam sıcaklığı ayarlanmaktadır.



Şekil 2. Deney sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of the experimental system)

Zorlanmış taşınım ile çalışan kondenser, izoleli bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Kanal içerisine yerleştirilen ve varyak tarafından kontrol edilen elektrikli rezistanslar ile yoğuşma sıcaklığı istenen değerde tutulmuştur. Basınç ve sıcaklık ölçümünde her bir bileşenin giriş ve çıkışına yerleştirilen basınç transdüseri ve K-tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Devrede dolaşan soğutucu akışkan miktarı Coriolis tipi kütleli debi ölçer ile tespit edilmiştir. Kompresörün elektrik tüketimi güç ölçer ile belirlenmiştir. Anlık olarak okunan veriler, veri toplama kartıyla bilgisayara aktarılmış ve bir yazılımla kayıt edilmiştir.

Ölçüm cihazlarının özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Test edilen soğutucu akışkanların termodinamik özellikleri REFPROP (Lemmon vd., 2017) yazılımından alınmıştır. Evaporatör aşırı kızdırma değeri, 6.5-8 K değerini bulacak şekilde termostatik genişleme valfi (TXV) vidası ile ayarlanmıştır. Testler, 15-25 dakika boyunca kaydedilen kararlı durum koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri (The technical specifications of the measuring instruments)

	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Basınç ölçer	0-40 bar	±1% FSO
K tipi ısı çifti	-50-150°C	±0.5°C
Coriolis debi ölçer	0-250 kg/h	±0.1%
Güç ölçer	0-6000 W	±1.5%

Deneyler iki farklı soğutucu akışkan için -4°C ve +4°C evaporasyon ile 30°C ve 50°C yoğuşma sıcaklıklarında verilen çalışma şartlarında elde edilen verilerle hesaplanmıştır.

4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENTAL DATA)

Evaporatör çıkış ve girişindeki entalpi, ölçülen sıcaklık ve basınç verilerine göre belirlenmiştir. Daha sonra, evaporatörün soğutma kapasitesi \dot{Q}_e , kW cinsinden şu şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_{e,\zeta} - h_{e,g}) \quad (1)$$

burada \dot{m} ölçülen kütleli debidir. Performans katsayısı, COP şu şekilde tanımlanır:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_e}{W_{el}} \quad (2)$$

W_{el} kompresörün kW cinsinden güç tüketimidir. Kondenser üzerinde dolaşan havanın sıcaklığı istenilen değere eşitlendiği anda sistemin kararlı durum rejimine ulaşması beklenmiştir. Çalışmada ayrıca kompresörün hacimsel verimliliği de test edilen soğutucu akışkanlar için incelenmiştir. Hacimsel verimlilik η_v , ölçülen

kütleli debinin teorik kütleli debiye oranı ile bulunabilir:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ölçülen}}{\dot{m}_{teorik}} \quad (3)$$

burada teorik kütleli debi kg/s cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{m}_{teorik} = \frac{V_{disp} n}{v_{suc} 60} \quad (4)$$

burada V_{disp} , kompresörün süpürme hacmidir ve değeri $20.73 \text{ cm}^3/\text{devir}$, n devir/dakika cinsinden kompresör hızı ve v_{suc} ise kompresör emişindeki soğutucunun m^3/kg cinsinden özgül hacmidir. Kompresörün izentropik verimi (η_s):

$$\eta_s = \frac{(h'_{komp,\phi} - h_{komp,g})}{(h_{komp,\phi} - h_{komp,g})} \quad (5)$$

burada $h'_{komp,\phi}$, kompresörün çıkışındaki sabit entropiye karşılık gelen kompresör çıkışındaki entalpi iken, $h_{komp,\phi}$ ve $h_{komp,g}$, sırasıyla soğutucu akışkanın kompresör çıkış ve girişindeki gerçek entalpi değerleridir. Bu değerler ölçülen sıcaklık ve basınç verilerden belirlenebilir.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

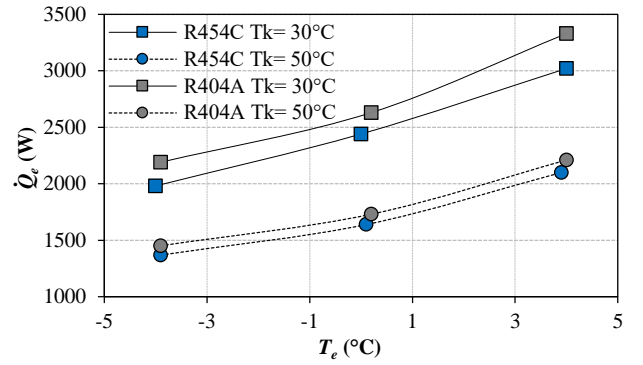
5.1. Enerji analizi (Energy Analysis)

Tablo 3'de test çalışma şartları ve aşırı kızdırma (SH) ve aşırı soğutma (SC) değerleri verilmiştir. Yoğuşma sıcaklıkları (T_k) çevre sıcaklığının değiştirilmesi ile sabitlenmeye çalışılmış, testler için $\pm 1^\circ\text{C}$ fark kabul edilmiştir. SC değerleri gaz şarj optimizasyonu ile 3°C civarında tutulmaya çalışılmıştır. Aşırı kızdırma değerleri gaz şarj ile etkilenmiş, termostatik genişleme valfi ayar vidası ile 8°C civarına ayarlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 3. Deneysel çalışma şartları (Operating conditions in the experimental tests)

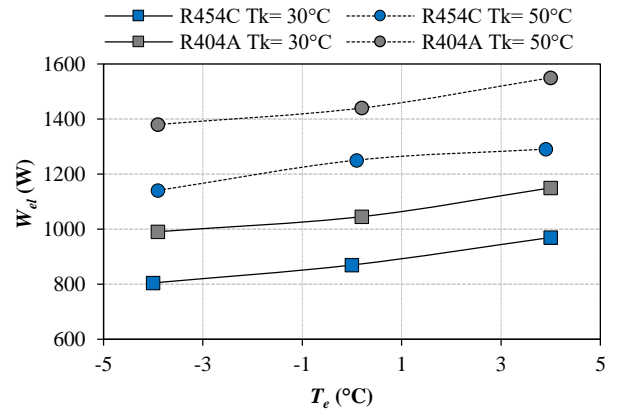
Gazlar	30°C			50°C		
	T_e (°C)	SH (°C)	SC (°C)	T_e (°C)	SH (°C)	SC (°C)
R404A	-3.9	7	3	-3.9	6.6	2.3
	4	8	2.6	4	7	2.2
R454C	-4	7.7	3.2	-3.9	7.5	2.5
	3.9	7.9	2.9	3.9	7.8	2.1

R404A ile R454C'nin evaporasyon sıcaklığıyla soğutma kapasitelerinin değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Genel olarak T_e 'nin artması ve T_k 'nin azalmasıyla soğutma kapasiteleri artmaktadır. Bunun nedeni Denklem (1)'de tanımlandığı gibi kütleli debi ve entalpi farkının artmasıdır. Şekil 3'e göre R454C'nin, R404A'ya kıyasla ortalama %6 daha düşük soğutma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir.



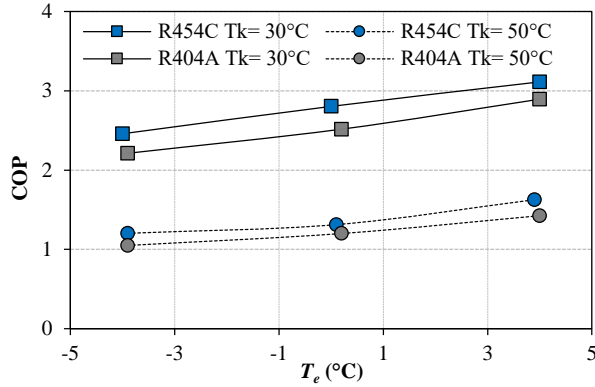
Şekil 3. Soğutma kapasitesinin evaporasyon sıcaklığıyla değişimi (The variation of cooling capacity with evaporation temperature)

Şekil 4'de çalışılan evaporatör ve kondenser sıcaklıklarındaki güç tüketimleri (W_{el}) görülmektedir. Her koşulda R404A'nın güç tüketim değerleri incelenen alternatif akışkandan daha yüksek bulunmuştur. Evaporatör ve kondenser sıcaklıklarındaki artışla birlikte kompresör güç tüketiminin de arttığı belirgindir. R454C'nin güç tüketimi, R404A'dan %14 daha düşüktür.



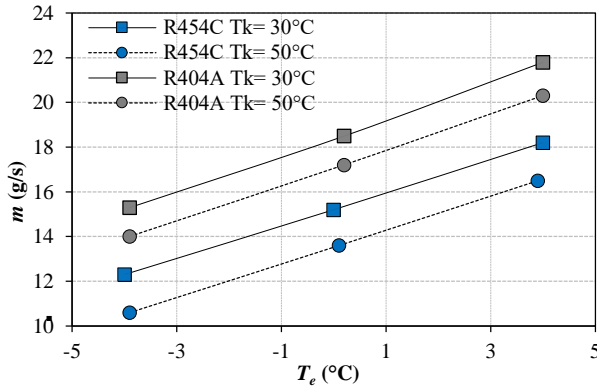
Şekil 4. Kompresör güç tüketiminin evaporasyon sıcaklığı ile değişimi (The variation of compressor's power consumption with evaporation temperature)

Şekil 5'de farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında COP değerleri incelenmiştir. R404A'nın COP değerleri diğer alternatiften daha düşüktür. R454C'nin elektrik tüketimi düşük ancak soğutma kapasitesi de R404A dan düşük olmasına rağmen COP değeri R404A dan ortalama %11 daha yüksek çıkmıştır.



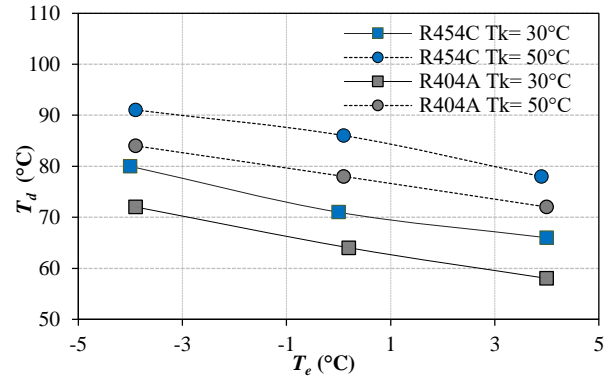
Şekil 5. Performans katsayısının evaporasyon sıcaklığıyla değişimi (The variation of COP with evaporation temperature)

Test edilen soğutucu akışkanların kütleli debi değerinin (\dot{m}) T_e ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Tüm koşullar için en yüksek \dot{m} değeri R404A'ya aittir. Kütleli debi ağırlıklı olarak kompresör emiş hattındaki sıcaklığa karşılık gelen buhar yoğunluğuna bağlıdır. Bu değer, evaporasyon sıcaklığı, T_e ve aşırı kızdırma (SH) değerine bağlı değişir. R404A'ya kıyasla R454C'nin kütleli debi değerleri ortalama %13 daha düşüktür. R454C'nin incelendiği benzer çalışmalarda (Mota-Babiloni vd., 2018; Llopis vd., 2019), R454C'nin COP değerleri, R404A'dan yüksek tespit edilmiştir, böylece mevcut çalışma sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 6. Kütleli debinin evaporasyon sıcaklığıyla değişimi (The variation of mass flow rate with evaporation temperature)

Kompresör deşarj sıcaklığı, T_d soğutma sistemlerinin analizinde önemli faktördür. Deşarj sıcaklığını azaltmak COP'yi artırır. Ayrıca yüksek T_d kompresör yağının bozulmasına neden olabilir. Şekil 7'de, kompresör çıkış sıcaklığının T_e ile değişimi görülmektedir. Her iki soğutucu akışkan için, T_e 'nin artmasıyla T_d değerleri azalmaktadır. R454C'nin kompresör sıcaklığı R404A'dan yüksektir. Benzer çalışmalarda da (Minor vd., 2016; Mota-Babiloni vd., 2018; Llopis vd., 2019) R454C'nin T_d değerleri R404A'dan yüksek tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmadaki sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Kompresör çıkış sıcaklığının evaporasyon sıcaklığıyla değişimi (The variation of compressor discharge temperatures with evaporation temperature)

Tablo 4 çalışma sonuçları ile ilgili kritik basınç (P_{kr}) Denklem (3)'den elde edilen volümetrik verim (η_v), Denklem (5)'den bulunan izentropik verim (η_s) ve kuruluk derecesi (X) değerlerini göstermektedir. R454C'nin P_{kr} değeri R404A'da daha yüksek tespit edilmiştir. Kondenser sıcaklığı ile evaporasyon sıcaklığı birbirine yaklaştıkça P_{kr} değeri de azalmaktadır. Düşük P_{kr} değerleri için hacimsel verim artar. Hacimsel verim, η_v R404A için yaklaşık %57 ila %71 arasında bulunmuştur. Soğutucu akışkanın evaporatöre olabildiğince sıvı fazında girmesi istenir. Böylece soğutma etkisi ($h_g - h_g$) miktarı da artacaktır. Kondenserdeki basıncın azalması, evaporatör girişindeki kuruluk derecesi X 'in azalmasına neden olur. R404A'nın X değeri, R454C'den daha yüksek tespit edilmiştir.

Tablo 4. R404A ile R454C'nin çalışmadaki bazı sonuçları (Some results of R404A and R454C in the study)

Gazlar	30°C				50°C			
	P_{kr}	η_s	η_v	X	P_{kr}	η_s	η_v	X
R404A	2.7	0.3	0.6	0.2	4.4	0.3	0.5	0.4
	6	8	8	7	8	6	7	7
	2.0	0.3	0.7	0.2	3.2	0.3	0.6	0.4
	2	9	1	0	8	6	4	1
R454C	2.7	0.3	0.7	0.2	4.5	0.3	0.6	0.2
	1	9	2	3	2	6	1	6
	1.9	0.4	0.7	0.1	3.2	0.3	0.6	0.2
	7	3	5	6	8	8	8	5

5.2. TEWI Analizi (TEWI Analysis)

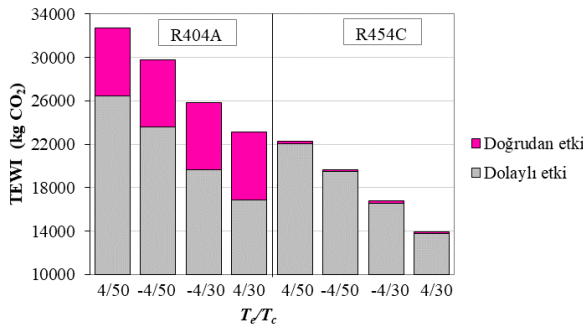
TEWI, kg CO₂ emisyon olarak ifade edilir ve soğutma ve iklimlendirme cihazlarının küresel ısınmaya etkisini gösteren bir parametredir. TEWI değeri şu şekilde hesaplanır (Mota-Babiloni vd., 2020):

$$TEWI = m \cdot L_{y1} \cdot N \cdot GWP_{100} + E_{y1} \cdot N \cdot \beta \quad (6)$$

TEWI analizini gerçekleştirmek için bazı varsayımlar yapılır. Denklemde N soğutma cihazının çalışma ömrüdür ve 15 yıl olarak kabul edilmiştir. Deneysel

çalışmada R404A ve R454C durumları için sisteme yapılan soğutucu akışkan şarj miktarı (m) sırasıyla 1.5 kg ve 1.4 kg'dır. Yıllık kaçak oranı ($L_{yıl}$) %7 ve β karbon emisyon faktörü ($\text{kgCO}_2\text{-kWh}^{-1}$) farklı ülkelere göre farklı değerler dikkate alınmıştır. $E_{yıl}$ yıllık elektrik tüketimidir (kWh). Soğutma sisteminin günde 6 saat, 365 gün çalıştığı kabul edilmiştir.

Denklemler (6)'ya göre hesaplanan TEWI değerlerinin ile T_e ve T_c değerlerine göre değişimi Şekil 8'de verilmiştir. R404A'nın dolaylı ve doğrudan etkisi R454C'den yüksektir. Doğrudan etki her sıcaklık için sabit olup, belirleyici değişken GWP değeri ve soğutucu akışkan şarj miktarıdır. Dolaylı etkide ise en önemli değişken enerji tüketimidir. R404A yerine R454C kullanılmasıyla karbon emisyon değerlerinde çok büyük azalma meydana gelecektir.



Şekil 8. R404A ve R454C için TEWI değerlerinin evaporasyon ve kondenser sıcaklıklarına göre değişimi (The variation of TEWI values for R404A and R454C according to evaporation and condensation temperatures)

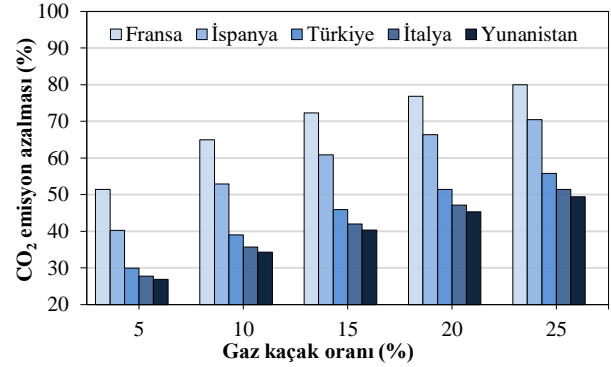
5.3. Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi (Carbon Footprint Assessment)

Daha önceki çalışmalarda soğutma sistemleri için detaylı karbon ayak izi analizi bulunmamaktadır. Mota-Babiloni vd. (2020), farklı karbon emisyon faktörleri ve soğutucu akışkan kaçak oranlarını, Mateu-Royo vd. (2021) ülkelere göre TEWI azalma değerlerini incelemiştir. Bu çalışmada da, farklı kaçak oranları ve Akdeniz ülkelerinden Türkiye, İtalya, Fransa, İspanya ve Yunanistan'ın karbon emisyon faktörleri, β sırasıyla 0.52, 0.65, 0.13, 0.24 ve 0.72 $\text{kgCO}_2\text{-kWh}^{-1}$ (Mota-Babiloni vd., 2020) için mukayese edilmiştir. Her iki soğutucu akışkan için TEWI değerlerindeki bağıl CO_2 emisyon azalma miktarı denklem 7 ile hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ emisyon azalması} = \frac{\text{TEWI}_{R404A} - \text{TEWI}_{R454C}}{\text{TEWI}_{R404A}} \times 100 \quad (7)$$

Şekil 9'da, R404A yerine R454C kullanılması sonucu TEWI değerlerindeki bağıl azalma ile gaz kaçak oranı arasındaki ilişki verilmiştir. Karbon emisyon faktörleri yüksek olan Yunanistan, İtalya ve Türkiye'de soğutucu akışkan değişimiyle daha az CO_2 azalmasına neden olacaktır. Karbon emisyon faktörleri düşük olan Fransa ve İspanya'da soğutucu akışkan değişimiyle daha fazla CO_2 azalması meydana gelmektedir. Yıllık gaz

kaçığı oranının artması TEWI değerinin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte R404A'nın yüksek GWP değerinden dolayı, sistemde R454C soğutucu akışkanı kullanılması sonucu CO_2 emisyonlarında azalma meydana gelmektedir.



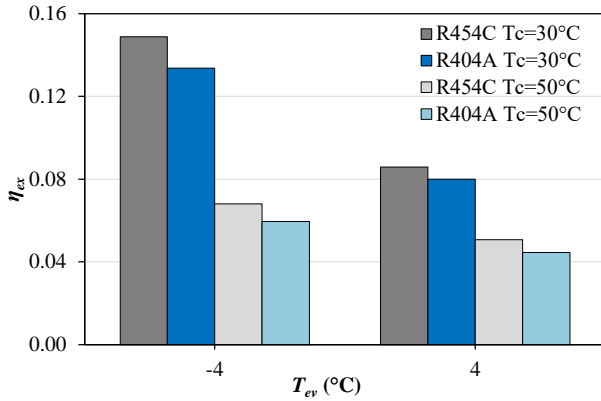
Şekil 9. R404A yerine R454C'nin kullanılmasıyla CO_2 emisyon azalma miktarının ülkelere göre değişimi (The variation of CO_2 emission reduction amount according to countries by using R454C instead of R404A)

5.4. Ekserji Analizi (Exergy Analysis)

Ekserji, soğutma sistemindeki soğutucu akışkanlar arasındaki tersinmezlik dağılımı hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir. Ekserji verimi, soğutma sisteminin soğutma performans katsayısının, soğuk oda sıcaklığı ile ölü durum sıcaklığı arasında çalışan tersinir soğutma sisteminin, soğutma performans katsayısına oranı olarak tanımlanır (Devecioğlu ve Oruç, 2021);

$$\eta_{ex} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{tr}} \quad (8)$$

Şekil 10'da, çalışılan gazların ekserji veriminin evaporasyon sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Evaporasyon sıcaklığının artmasıyla ekserji veriminin azaldığı ve en yüksek ekserji veriminin R454C gazına ait olduğu görülebilir. -4°C evaporasyon ve 30°C kondenser sıcaklığı için R454C'nin ekserji verimi, R404A'dan %15 daha yüksek bulunmuştur. $+4^\circ\text{C}$ evaporasyon ve 30°C kondenser sıcaklığı için R454C'nin ekserji veriminin, R404A'dan %11 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ekserji verimlerinin düşük olmasının sebebi, ölü durum sıcaklığı ile soğuk oda sıcaklıkları arasındaki farkın düşük olmasıdır.



Şekil 10. Ekserji veriminin evaporasyon sıcaklığıyla değişimi (The variation of exergy efficiency with evaporation temperature)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek GWP'li R404A'nın artık yeni cihazlarda kullanılamaması ve yerine düşük GWP'li soğutucu akışkanların geçmesi gerektiği için, bu çalışmada R404A'nın yerine kullanılabilecek GWP değeri 146 olan, HFO/HFC karışımı R454C'nin deneysel olarak incelenmesi yapılmıştır. Düşük GWP değerli soğutucu akışkanların araştırma eksiklikleri bu çalışmanın ana çıkış noktasıdır. Deneyler iki farklı kondenser sıcaklığı (30 ve 50°C) ve iki farklı evaporatör sıcaklığı (-4 ve +4°C) için aynı şartlar altında yapılmıştır. Çalışmayla ilgili ana çıkarımlar şunlardır:

- R404A yerine R454C kullanarak GWP değerinde %95'lik azalma sağlamak mümkündür.
- HFO/HFC karışımı alternatif hafif alev alabilir güvenlik sınıfındadır ve sıcaklık kayması değerleri biraz yüksektir. R454C, R404A'ya benzer termodinamik ve taşınım özellikleri göstermektedir.
- Kritik sıcaklık değeri yüksektir bu sayede sıcak iklimlerde kullanılması uygun olabilir.
- R454C'nin COP değerleri R404A'dan %10 daha yüksek tespit edilmiştir.
- R454C'nin soğutma kapasitesi R404A dan ortalama %6 daha düşük bulunmuştur.
- R454C'nin güç tüketimi R404A'dan ortalama %15 daha düşüktür.
- TEWI değerleri R404A'dan düşük elde edilen R454C'nin çevresel değerler açısından çok daha üstün olduğu görülmüştür.
- Karbon ayak izi değerlendirmesinde, R454C kullanılması ile yüksek miktarda CO₂ azalımı sağlanabilecektir.
- R454C'nin ekserji verimi R404A'dan yaklaşık %10-%15 daha yüksek bulunmuştur.

Başka bir çalışma konusu olarak, incelenen soğutucu akışkanların sabit çevre sıcaklıklarında mukayese edilmesi termodinamik özelliklerin daha detaylı anlaşılması açısından faydalı olacaktır.

Semboller (Symbols)

COP	performans katsayısı
$E_{yıl}$	yıllık elektrik tüketimi, kWh
GWP	küresel ısınma potansiyeli
HC	hidrokarbon
HFC	hidroflorokarbon
HFO	hidrofloroolefin
h	entalpi, kJ/kg
h'	sabit entropi hal değişimindeki entalpi, kJ/kg
$L_{yıl}$	yıllık kaçak oranı
m	soğutucu akışkan şarj miktarı, kg
\dot{m}	soğutucu akışkan kütleli debisi, kg/s
N	cihazın çalışma ömrü (yıl)
n	kompresör hızı, devir/dakika
P	basınç, kPa
\dot{Q}_e	soğutma kapasitesi, W
SC	aşırı soğutma, °C
SH	aşırı kızdırma, °C
T	sıcaklık, °C
v	özgül hacim, m ³ /kg
V_{disp}	devir başına kompresör yer değiştirilmesi, m ³ /rev
W_{el}	kompresör güç tüketimi, W
η_{ex}	ekserji verimi
η_s	izentropik verimlilik
η_v	volümetrik verimlilik
β	karbon emisyon faktörü, kgCO ₂ -kWh ⁻¹
$Alt indisler$	
d	deşarj
e	evaporatör
k	kondenser
komp	kompresör
kr	kritik
g	giriş
\dot{c}	çıkış
suc	emme
tr	tersinir

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION of ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Atilla G. DEVECİOĞLU: Deneyleri gerçekleştirip yorumlanmış ve yazım işlemini yapmıştır.

Vedat ORUÇ: Veri analizlerini yorumlamış ve yazım işlemini yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] IPCC, UNEP, Others Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, (2005).
- [2] Calm, J.M., The next generation of refrigerants-historical review, considerations, and outlook *International Journal of Refrigeration*, 31: 1123-1133, (2008).
- [3] Yang, M., Zhang, H., Meng, Z., & Qin, Y. Experimental study on R1234yf/R134a mixture (R513A) as R134a replacement in a domestic refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 146: 540-547, (2019).
- [4] UNIDO (The United Nations Industrial Development Organization), 2017. Way to go with UNIDO mapping HFC phase-down, https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-04/UNIDO-brochure_HFC-Phase_Down-Complete.pdf. Last Access date: 08.06.2020.
- [5] Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006. Official Journal of the European Union. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>. Accessed date: 08.06.2020.
- [6] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbri, J., Barragan-Cervera, A., Moles, F., Peris, B., Verdu, G, Commercial refrigeration-An overview of current Status. *International Journal of Refrigeration*, 57: 186-196, (2015a).
- [7] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. 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, (2019).
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), ANSI/ASHRAE Standard 34, designation and safety classification of refrigerants (2016).
- [9] Mota-Babiloni, A , Navarro-Esbri, J , Peris, B , Molés, F , Verdú, G , Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems. *Energy Convers. Manag.* 105, 756–762, (2015b).
- [10] Makhnatch, P , Mota-Babiloni, A , Rogstam, J , Khodabandeh, R, Retrofit of lower GWP alternative R449A into an existing R404A indirect supermarket refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* 76: 184–192, (2017).
- [11] Oruç, V, Devocioğlu, A.G., Ender, S., Improvement of energy parameters using R442A and R453A in a refrigeration system operating with R404A. *Applied Thermal Engineering* 129: 243–249, (2018).
- [12] Mota-Babiloni, A., Haro-Ortuño, J., Navarro-Esbri, J., & Barragán-Cervera, Á. Experimental drop-in replacement of R404A for warm countries using the low GWP mixtures R454C and R455A. *International Journal of Refrigeration*, 91: 136-145, (2018).
- [13] Heredia-Aricapa, Y., Belman-Flores, J. M., Mota-Babiloni, A., Serrano-Arellano, J., & García-Pabón, J. J. Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A. *International Journal of Refrigeration*, 111: 113-123, (2020).
- [14] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Maiorino, A., Nebot-Andrés, L., Sánchez, D., & Cabello, R., TEWI analysis of a stand-alone refrigeration system using low-GWP fluids with leakage ratio consideration. *International Journal of Refrigeration*, 118: 279-289, (2020).
- [15] Sethi, A., Pottker, G., Motta, S.Y., Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration, *Science and Technology for the Built Environment*, 22:8, 1175-1184, (2016).
- [16] Devocioğlu, A.G., Oruç, V. Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 27(1): 61-69, (2021).
- [17] Li, G., Comprehensive investigation of transport refrigeration life cycle climate performance. *Sustain. Energy Technol. Assessm.* 21: 33–49, (2017).
- [18] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, (2018).
- [19] Minor, B , Shah, S , Simoni, L ,. Testing of HFO refrigerant with less than 150 GWP in a commercial freezer. In: Proceedings of the Sixteenth International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. West Lafayette (IN), USA Paper 2388, 11-14 July (2016).
- [20] Mota-Babiloni, A., Barbosa Jr, J. R., Makhnatch, P., & Lozano, J. A. Assessment of the utilization of equivalent warming impact metrics in refrigeration, air conditioning and heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129: 109929, (2020).
- [21] Mateu-Royo, C., Adrian Mota-Babiloni, Joaquin Navarro-Esbri. Semi-empirical and environmental assessment of the low GWP refrigerant HCFO-1224yd(Z) to replace HFC-245fa in high temperature heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, 127: 120-127 (2021).