

# Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevriminde R134a Yerine R1234yf ve R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile R1234yf/CNTs Nanosoğutucu Akışkanların Kullanımının Termodinamiğin I. ve II. Kanunları Bakımından Teorik Olarak İncelenmesi

Kemal BİLEN<sup>a</sup>, Kayhan DAĞIDIR<sup>b,\*</sup>, Erol ARCAKLIOĞLU<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye

<sup>b</sup> Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Mersin, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 01.05.2021  
Kabul: 20.09.2021

### Anahtar Kelimeler:

R134a, R1234yf,  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs,  
Nanosöğutucu  
akışkan,  
R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  
R1234yf/CNTs, BSSS,  
COP.

## ÖZ

Bu çalışmada; soğutucu akışkan olarak R134a kullanılan bir Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sisteminde (BSSS'de), R134a'nın alternatifi olarak görülen R1234yf soğutucu akışkanı, alüminyumdioksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve karbon nanotüp (CNT) nanoparçacıkları ilavesiyle iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Soğutma sistemi aynı şartlarda, yalnızca iş akışkanı değiştirilerek, termodinamik bakımdan teorik olarak incelenmiştir. İncelemeler, farklı buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıkları için geniş bir aralıkta gerçekleştirilmiştir. BSSS'de iş akışkanı olarak R134a ve R1234yf kullanımına yönelik -7 °C buharlaşma ve 45 °C yoğuşma sıcaklıklarındaki analizler sonucunda, sistemin soğutma tesir katsayısı (COP) R134a için 1.950 ve R1234yf için 1.824 olarak hesaplanmış, COP değerleri arasında %6.46'lık bir fark ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, ikinci kanun verimleri (ekserji verimleri) arasında ise %6.44'lük bir fark oluşturmuştur. Bu fark göz önüne alınarak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CNT nanoparçacıklarının ilavesiyle elde edilen R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanosoğutucu akışkanları için analizler tekrar edilmiştir. Analizler sonucunda, COP değerinin ve ekserji veriminin, nanoparçacık hacimsel oranı ile artmakta olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, -7 °C buharlaşma ve 45 °C yoğuşma sıcaklıklarında, R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılan sistemde, R134a'nın tek başına kullanıldığı duruma göre COP değerindeki ve ekserji verimindeki artışların sırasıyla %18.46 ve %18.43 değerlerine kadar ulaştığı tespit edilmiştir. R1234yf/CNTs kullanılması durumunda ise bu artışlar sırasıyla, %6.92 ve %6.89 değerlerine ulaşmaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.02>

## Theoretical Analysis of Usage of R1234yf Refrigerant and R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R1234yf/CNTs Nanorefrigerants instead of R134a in the Vapor Compression Refrigeration Cycle in terms of I. and II. Laws of Thermodynamics

## ARTICLE INFO

Received: 01.05.2021  
Accepted: 20.09.2021

### Keywords:

R134a, R1234yf,  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs,  
Nanorefrigerant,  
R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

## ABSTRACT

In this study, in a Vapor Compression Refrigeration System (VCRS) using R134a as refrigerant, R1234yf refrigerant considered as an alternative to R134a has been used as working fluid with the addition of aluminumdioxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and Carbon NanoTubes (CNTs) nanoparticles. This system has been theoretically investigated in terms of thermodynamics under the same conditions, only by changing the working fluid. Investigations have been performed over a wide range for varying evaporation and condensation temperatures. The system using R134a and R1234yf as the working fluid have been analysed at the same conditions. As a result of the analyses at -7 °C evaporation

\*Corresponding author: kayhandagidir@tarsus.edu.tr

To cite this article: K. Bilen, K. Dağdır and E. Arcaıklıoğlu, "Theoretical Analysis of Usage of R1234yf Refrigerant and R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R1234yf/CNTs Nanorefrigerants instead of R134a in the Vapor Compression Refrigeration Cycle in terms of I. and II. Laws of Thermodynamics", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 183-195, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.02

R1234yf/CNTs,  
VCRS, COP.

and 45 °C condensation temperature, the Coefficient of Performance (COP) of the system has been calculated as 1.950 and 1.824 for pure R134a and R1234yf, respectively. There is a difference of 6.46% between COP values. Similarly, a difference of 6.44% between the second law efficiencies (exergy efficiencies) have been found as well. Thus, R1234yf refrigerant with the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CNTs nanoparticles has been used as the nanorefrigerant instead of R134a refrigerant at the same conditions in analyses. As a result of the analyses, it has been observed that the COP and exergy efficiency increase with the nanoparticle volumetric concentration. Results have revealed that COP and exergy efficiency have increased up to values of 18.46% and 18.43% compared to usage of pure R134a refrigerant at -7 °C evaporation and 45 °C condensation temperatures for the R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorefrigerant, respectively. Similarly, these increases have reached up to values 6.92% and 6.89% for R1234yf/CNTs nanorefrigerant as well.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.02>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Soğutma sistemleri günümüzde hem büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda hem de nispeten küçük ölçekli uygulamalarda çok yaygın hale gelmiştir. Hatta sağlık ve gıda gibi çok önemli sektörlerde artık bir zorunluluktur. Konu böylesine önemli olunca, araştırmacıların da bu alana olan ilgileri artmıştır. Birçok araştırmacı bu alanda çalışmalar yürütmektedir. Diğer taraftan son yıllarda artan küresel endişeler çerçevesinde, önemli uluslararası çevre örgütleri tarafından mevcut durumda kullanılmakta olan bazı soğutucu akışkanların kısıtlanmasına yönelik kararlar alınmıştır. R134a soğutucu akışkanı da kullanımına kısıtlama getirilen soğutucu akışkanlardandır [1]. Araştırmacılar, R134a yerine alternatif soğutucu akışkan arayışına başlamışlardır. Bu araştırmalar kapsamında R1234yf soğutucu akışkanı, R134a için iyi bir alternatif olarak önerilmekte ve güncel çalışmalarda en iyi alternatiflerden biri olarak gösterilmektedir [2-5]. Ancak R1234yf soğutucu akışkanı, R134a yerine kullanıldığında sistemin performansında bir miktar düşüş olduğu görülmüştür. Bu performans düşüşü hem teorik çalışmalarla hem de deneysel çalışmalarla ortaya konmaktadır.

Li vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, R1234yf soğutucu akışkanının R134a'nın yerini alıp alamayacağı deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmanın sonucunda, R1234yf soğutucu akışkanı için sistemin soğutma tesir katsayısı (COP), 40 °C yoğuşma ve 0 °C buharlaşma sıcaklığında R134a soğutucu akışkanına göre %20 daha düşük çıkmıştır. R134a'nın kısıtlanması ve R1234yf'nin bu soğutucu akışkana iyi bir alternatif olmasına karşın, ortaya çıkan performans düşüşü önemli bir problem oluşturmaktadır. Enerji verimliliğinin oldukça önemli hale geldiği günümüzde, herhangi bir performans

düşüşü mutlaka üzerine gidilmesi gereken bir sorun olarak karşımızda durmaktadır.

Bu durumda; R1234yf'nin, R134a yerine kullanılabilirliğine karşın ortaya çıkan performans düşüşünün farklı yöntemlerle iyileştirilebilmesine yoğunlaşmak akılcı bir yaklaşım olacaktır. Bu doğrultuda, son dönemde dikkat çeken uygulamalardan olan nanosoğutucu akışkan uygulamasına R1234yf'nin dahil edilmesi dikkate değerdir.

Nanoakışkan teknolojisinin bir alt uygulaması olan nanosoğutucu akışkan uygulaması, soğutucu akışkana nanoparçacık katkısını içermektedir. Nanosoğutucu akışkanlar, son dönemde özellikle Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemlerinde (BSSS'lerde) sıklıkla kullanılmaktadır [7]. Nanoparçacık ilavesinin akışkanların termofiziksel özelliklerinde bir iyileşme sağladığı, soğutucu akışkanlar üzerinde de denenmekte olduğu ve nanosoğutucu akışkan uygulamasının giderek önem kazandığı bilinmektedir [8-10]. Ajayi vd. [11], R134a soğutucu akışkanı kullanılan bir BSSS'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacığı katkısının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. İnceleme sonucunda nanoparçacık katkısının sistemin performansını artırdığı belirtilmiştir. Adelekan vd. [12] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise R600a soğutucu akışkanı kullanılan sisteme grafen nanoparçacığı ilavesinin sistem performansına etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, nanoparçacık katkısının artmasıyla sistem performansının da arttığı belirtilmiştir.

Adelekan vd. [13] tarafından gerçekleştirilen bir başka deneysel çalışmada ise yine R600a soğutucu akışkanı kullanılan sisteme titanyumdioksit (TiO<sub>2</sub>) nanoparçacığı ilavesinin sistem performansına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, nanoparçacık katkılı sistemin yalın haldeki sistemden daha iyi bir performansa sahip olduğu ifade edilmiştir. Jatinder

vd. [14] deneysel çalışmalarında R600a ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) olmak üzere iki farklı soğutucu akışkan kullanılan sistemde  $TiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, aynı şartlarda  $TiO_2$  katkılı R600a kullanılan sistemin LPG kullanılan sistemden daha iyi bir performansa sahip olduğu ifade edilmiştir. Babarinde vd. [15] R600a kullanılan sisteme CNTs ilavesinin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda sistemin enerji tüketiminin nanoparçacık ilavesiyle düşmekte olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda CNTs katkısıyla birlikte R600a kullanımının R134a'ya bir alternatif olarak düşünülebileceği de vurgulanmıştır. Babarinde vd. [16] tarafından gerçekleştirilen bir başka deneysel çalışmada ise R600a kullanılan sisteme grafen nanoparçacıklarının etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek COP değerine 3.2 ile nanoparçacık katkılı durumda ulaşıldığı belirtilmiştir. Salem [17], R134a kullanılan BSSS'de, CNTs ilavesinin etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda nanoparçacık katkısının sistem performansını iyileştirdiğini belirtmiştir. Nair vd. [18] R134a kullanılan sistemde  $Al_2O_3$  ilavesinin sistem performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, COP değerinde nanoparçacık ilavesiyle birlikte %6.5 oranında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Mohan vd. [19] deneysel çalışmalarında CNTs, altın ve kloroaurikosit ( $HAuCl_4$ ) nanoparçacıklarının R134a kullanılan sisteme ilavesinin performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel inceleme sonucunda; maksimum COP değerine, hacimsel olarak %0.1 altın ve %0.005 CNTs'nin birlikte ilavesiyle erişildiği belirtilmiştir. Chauhan [20], R134a kullanılan sisteme  $Al_2O_3$  ve silisyumdioksit ( $SiO_2$ ) nanoparçacıklarını ayrı ayrı ve birlikte ekleyerek sistem performansını deneysel olarak incelemiştir. Deneyler sonucunda nanoparçacıkların birlikte kullanımının, ayrı ayrı kullanımına kıyasla sistem performansını daha çok geliştirdiğini paylaşmıştır. Pico vd. [21] R32 soğutucu akışkanı kullanılan sisteme elmas nanoparçacığı ilavesini deneysel olarak incelemişler ve sonuç olarak nanoparçacık katkısıyla soğutma kapasitesinde %5, COP değerinde ise %0.5 artış olduğunu rapor etmişlerdir. Adelekan vd. [22] R600a kullanılan sisteme  $TiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkilerini deneysel olarak incelemişler ve sonuç olarak COP değerinin nanoparçacık katkısıyla 4.2 ile en yüksek değerine eriştiğini ifade etmişlerdir. Joshi vd. [23] R134a ve R600a soğutucu akışkanlarının kullanıldığı sisteme  $Al_2O_3$  ilavesinin sistem performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, kütsel olarak %0.1  $Al_2O_3$  içeren R600a'lı sistemdeki COP değerinin,

R134a'nın tek başına kullanıldığı sisteme kıyasla %37.2'lik artışla en yüksek değerine eriştiği belirtilmiştir. Senthilkumar ve Anderson [24] deneysel çalışmalarında, R410a kullanılan sisteme  $SiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkisini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda, nanoparçacık ilavesinin sistem performansını artırdığını rapor etmişlerdir.

Literatürde yer alan ve bu çalışma kapsamında incelenen deneysel çalışmalarda, nanoparçacık ilaveli sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalıştıkları vurgulanmaktadır. Son zamanlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tercih edilen soğutucu akışkanlar ve nanoparçacıklar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Güncel çalışmalarda tercih edilen soğutucu akışkanlar ve nanoparçacıklar (*Preferred refrigerants and nanoparticles in current studies*).

Sıra	Referans	Soğutucu akışkan	Nano parçacık	Yıl
1	Ajayi vd. [11]	R134a	$Al_2O_3$	2019
2	Adelekan vd. [12]	R600a	Grafen	2019
3	Adelekan vd. [13]	R600a	$TiO_2$	2019
4	Jatinder vd. [14]	R600a ve LPG	$TiO_2$	2019
5	Babarinde vd. [15]	R600a	CNTs	2020
6	Babarindea [16]	R600a	Grafen	2020
7	Salem [17]	R134a	CNTs	2020
8	Nair vd. [18]	R134a	$Al_2O_3$	2020
9	Mohan vd. [19]	R134a	CNT, Altın ve $HAuCl_4$	2020
10	Chauhan [20]	R134a	$Al_2O_3$ ve $SiO_2$	2020
11	Pico vd. [21]	R32	Elmas	2020
12	Adelekan vd. [22]	R600a	$TiO_2$	2021
13	Joshi vd. [23]	R134a ve R600a	$Al_2O_3$	2021
14	Senthilkumar ve Anderson [24]	R410a	$SiO_2$	2021

Tablo 1 incelendiğinde son dönemde nanoparçacık olarak genellikle metaloksitlerin ve karbon esaslı nanoparçacıkların tercih edilmekte olduğu görülmektedir. Tablo 1'e göre, metaloksitlerden en çok tercih edilen nanoparçacık  $Al_2O_3$  iken, karbon esaslı nanoparçacıklardan en çok tercih edilen nanoparçacık ise CNTs olmuştur. Buna göre bu çalışmada, çalışmayı zenginleştirmek için metaloksit esaslı  $Al_2O_3$  ve karbon esaslı CNT tercih

edilmiştir. Tercih sebebi olarak yaygın kullanımlarının yanında farklı morfolojik yapıları ve farklı termofiziksel özellikleri etkili olmuştur. Her iki nanoparçacığın morfolojik yapıları ve bazı termofiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi, bu iki nanoparçacığın termofiziksel özellikler birbirinden bir miktar farklıdır. Bununla birlikte,  $Al_2O_3$  küresel yapıda iken CNTs silindirik yapıdadır.

Tablo 2. Çalışma kapsamında tercih edilen nanoparçacıkların morfolojik yapıları ve bazı termofiziksel özellikleri (*Morphological structures and some thermophysical properties of the preferred nanoparticles within the scope of the study*) [25].

Sıra	Özellik	$Al_2O_3$	CNT
1	Morfolojik yapı	Küresel	Silindirik
2	Özgül yüzey alanı	138 m <sup>2</sup> /g	200 m <sup>2</sup> /g
3	Yoğunluk	3690 kg/m <sup>3</sup>	2100 kg/m <sup>3</sup>
4	Özgül ısı	880 J/(kg K)	9124 J/(kg K)
5	Isı iletim katsayısı	40 W/(m K)	3007.4 W/(m K)

Tüm bu gelişmeler incelendiğinde nanosoğutucu akışkanların daha etkin kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında, BSSS’lerde sıklıkla kullanılan R134a yerine alternatifi olan R1234yf’nin kullanımı teorik olarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, R1234yf kullanımının hem COP değerinde hem de ekserji veriminde düşüğe sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle, literatürdeki güncel gelişmeler doğrultusunda, R1234yf’nin nanoparçacık ilavesiyle kullanımının sistem performansını artıracığı öngörülmüştür. Böylece, literatürde sıklıkla tercih edilen  $Al_2O_3$  ve CNT nanoparçacıklarının R1234yf’ye ilavesinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin teorik olarak incelenmesi faydalı görülmüştür. Teorik modelin oluşturulabilmesi için literatürde yer alan benzer çalışmalar [26, 27] incelenmiş, çalışma kapsamında kullanılmasına karar verilen teorik model doğrulanmıştır. Doğrulan teorik model,  $Al_2O_3$  veya CNTs ilaveli R1234yf’nin BSSS’de iş akışkanı olarak değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Özet olarak bu çalışmanın amacı; BSSS’lerde sıklıkla iş akışkanı olarak kullanılan R134a yerine alternatifi R1234yf’nin aynı şartlarda kullanımının termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından incelenmesidir. Literatürden edinilen bilgiler dahilinde, R134a yerine tek başına R1234yf kullanımının performans düşüşüne neden olduğu bilinmektedir. Çalışmada aynı zamanda; bu

performans düşüşünün, nanoparçacık ilavesiyle telafi edilip edilemeyeceğinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. Bunun için; R1234yf’nin BSSS’de,  $Al_2O_3$  veya CNTs ilavesiyle nanosoğutucu akışkan olarak kullanımı termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından irdelenmiştir. Termodinamiğin II. kanunu kapsamında yapılan incelemeler, sistemin toplam ekserji veriminin belirlenmesiyle sınırlı tutulmuştur.

## 2. TEORİK MODEL (THEORETICAL MODEL)

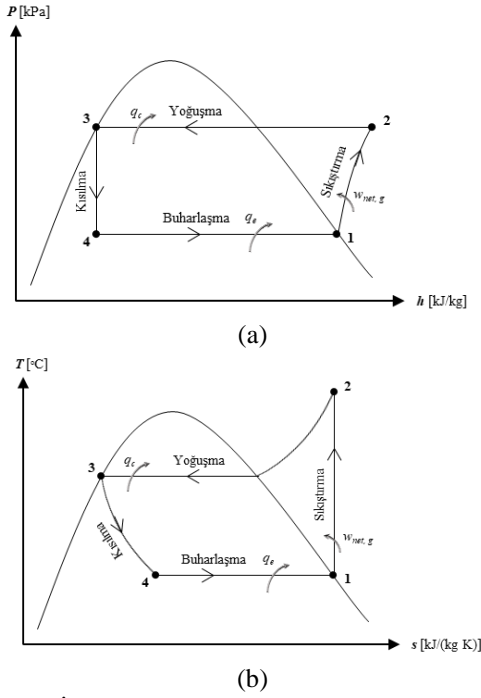
Bu çalışmada kullanılan yöntem; literatürdeki benzer çalışmalar yardımıyla, nanosoğutucu akışkanların BSSS’lerdeki kullanımına uygun olarak geliştirilen teorik bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşım ilerleyen kısımda detaylı olarak izah edilmiştir.

Teorik model, Aktas vd. [26] tarafından gerçekleştirilen çalışma temel alınarak oluşturulmuştur. Aynı çalışma, Kumar vd. [27] tarafından R134a ve R152a soğutucu akışkanlarına zirkonyumdioksit ( $ZrO_2$ ) nanoparçacığı katkısının etkilerini incelemek için temel alınmıştır.

Teorik modelin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle ideal bir BSSS ele alınmış ve kullanılacak temel termodinamik eşitlikler ifade edilmiştir. Şekil 1’de ideal bir Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevrimi (BSSÇ) görülmektedir.

İdeal BSSÇ aşağıdaki dört hal değişiminden oluşur:

- 1-2 Kompresörde izentropik sıkıştırma,
- 2-3 Yoğuşturucuda sabit sıcaklık ve sabit basınçta ısı çıkışı,
- 3-4 Genleşme cihazında sabit entalpide kısılma,
- 4-1 Buharlaştırıcıda sabit sıcaklık ve sabit basınçta ısı girişi.



Şekil 1. İdeal BSSÇ'nin  $P-h$  ve  $T-s$  diyagramları ( $P-h$  and  $T-s$  diagrams of ideal VCRC).

Çalışmanın amacı; çeşitli soğutucu ve nanoşutucu akışkanların etkisinin karşılaştırılması olduğu için akışkanlara aşırı kızdırma ve aşırı soğutma uygulanmamış, sistem ideal kabul edilerek akışkanın 1 noktasında doymuş buhar ve 3 noktasında doymuş sıvı olduğu varsayılmıştır. Sistemin COP değeri doğrudan kompresördeki enerji tüketimine bağlı olduğundan bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen incelemelerde kompresörün izentropik verimi, doğrulama çalışmalarında yararlanılan kaynaktaki değer olan  $\eta_{izen} = 0.51$  olarak alınmıştır. Şekil 1'de  $P-h$  ve  $T-s$  diyagramları verilen ideal çevrim için enerji dengesi birim kütle başına yazılırsa, buharlaştırıcıdaki ısı girişi  $q_e$ , yoğuşturucudaki ısı çıkışı  $q_c$  ve kompresördeki enerji tüketimi  $w_{net,g}$  olacaktır. Tüm hesaplamalar, sürekli rejim koşullarında geçerli olan bağıntılar kullanılarak yapılmıştır. İdeal BSSÇ için ilgili bağıntılar aşağıda verilmiştir.

### I. Kanun analizi:

$$COP = \frac{\text{Arzu edilen çıktı}}{\text{Gerekli girdi}} = \frac{\text{Soğutma etkisi}}{\text{Kompresör enerji tüketimi}} = \frac{q_L}{w_{net,in}} \quad (1)$$

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (2)$$

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (3)$$

$$w_{net,g} = h_2 - h_1 \quad (4)$$

$$\eta_{izen} = \frac{\text{izentropik kompresör işi}}{\text{Gerçek kompresör işi}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

### II. Kanun analizi:

$$COP_{tersinir} = COP_{maksimum} = COP_{Carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (7)$$

$$\eta_{II, çevrim} = \frac{COP}{COP_{tersinir}} \quad (8)$$

Denklem 7 ile verilen bağıntıdaki  $T_L$  ve  $T_H$  sırasıyla, soğutulacak ve ısıtılacak ortam sıcaklıklarını göstermekte olup bu çalışmada,  $T_L = 273.15$  K ve  $T_H = 298.15$  K olarak alınmıştır. Yukarıdaki bağıntılar, sistemin I. ve II. kanun analizleri için yeterlidir. Ancak, çalışma kapsamında sistem ayrıca nanoşutucu akışkanlar için de analiz edileceğinden bir denklem daha ilave edilmelidir. Bu denklem, nanoşutucu akışkanların yoğunluğunu veren 9 numaralı eşitliktir [26].

$$\rho_{nr} = \omega \rho_{np} + (1 - \omega) \rho_{pr} \quad (9)$$

$$v_{nr} = \frac{1}{\rho_{nr}} \quad (10)$$

İlk olarak, yukarıdaki bağıntılar yardımıyla, R134a ve R1234yf soğutucu akışkanları için ilgili değerler yerlerine yazılarak COP ve  $\eta_{II, çevrim}$  değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, nanoparçacık ilavesinin etkisi, Denklem 9 ve Denklem 10 yardımıyla hesaplamalara yansıtılmıştır. Nanoparçacık hacimsel oranı, nanoparçacık yoğunluğu ve soğutucu akışkan yoğunluğu Denklem 9'da yerlerine yazılarak nanoşutucu akışkanın yoğunluğu elde edilmiştir. Elde edilen yoğunluk değeri Denklem 10'da yerine yazılarak nanoşutucu akışkanın özgül hacmi hesaplanmıştır. Nanoparçacık ilavesinin, soğutma sisteminin çalışma basınçlarını değiştirmedeği kabul edilmiştir. Bu durumda, basınç değerleri yanında ikinci bir özellik olarak özgül hacimlerin de bilinmesi, nanoşutucu kullanılan sistemin bu çalışma kapsamındaki I ve II. kanun analizleri için yeterli olmaktadır.

Çalışmada kullanılan teorik modelin güvenilirliğini sağlamak için Aktas vd. [26] tarafından yapılan çalışma tekrarlanarak doğrulanmıştır. Doğrulama çalışması için bu çalışmanın seçilmesinde, literatürde genel kabul görmesi ve bazı çalışmalarda [27] referans olarak alınmış olması etkili olmuştur. Doğrulama çalışmasında kullanılan veriler, ilgili çalışmadan [26] alınan verilerdir. Doğrulama çalışmaları kapsamında elde edilen veriler Aktas vd. [26] tarafından elde edilen veriler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi doğrulama çalışmalarında elde edilen sonuçlarla

referans olarak alınan çalışmanın sonuçları neredeyse aynıdır.

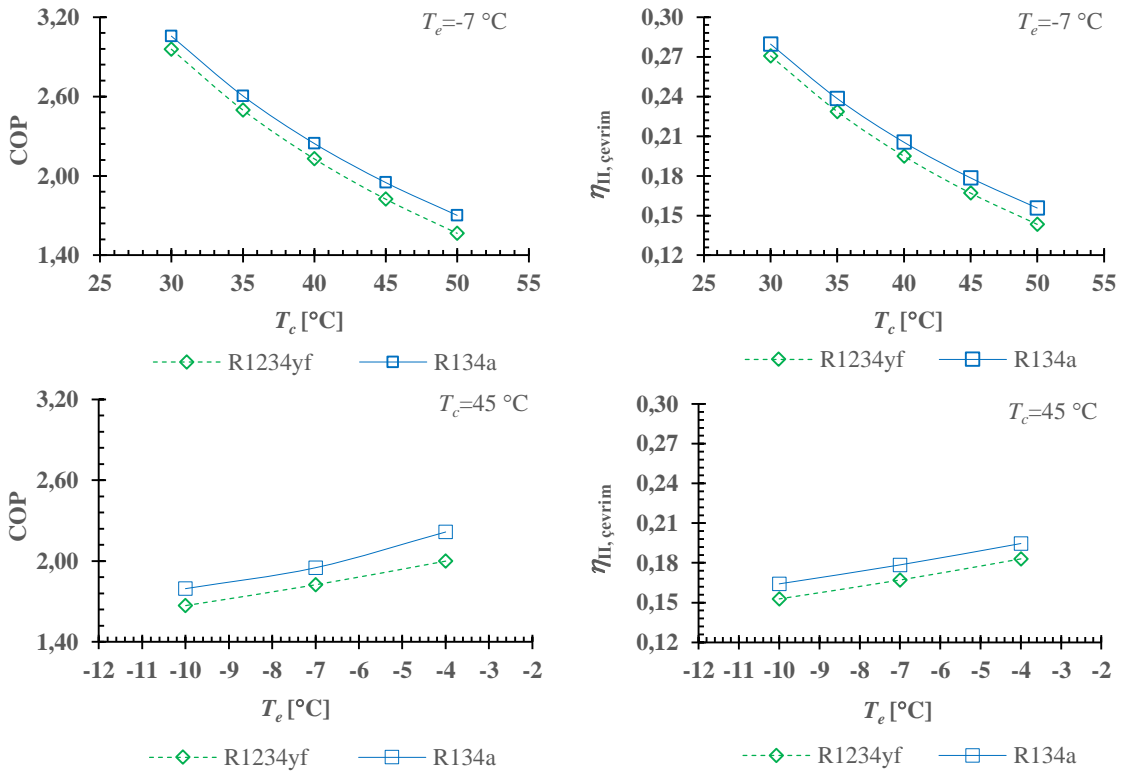
Tablo 3. COP değerleri bakımından teorik modelin doğrulanmasına ilişkin veriler (Some data related to validation of the theoretical model in terms of COP values).

	Soğutucu akışkan	$\omega$	$\rho_{Al_2O_3}$ (kg/m <sup>3</sup> )	COP
Aktas vd. [26]	R134a	0	-	1.96
Doğrulama	R134a	0	-	1.95
Aktas vd. [26]	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	3690	2.29
Doğrulama	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	3690	2.28
Aktas vd. [26]	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	2200	2.15
Doğrulama	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	2200	2.14

Referans alınan çalışmada [26] yalnızca enerji analizi yer aldığından, doğrulama çalışmaları enerji analizi ile sınırlı kalmıştır. Gerçekleştirilen enerji

analizinin doğrulanmış olması teorik modelin doğruluğu için yeterli görülmüştür. Modelin doğruluğu ortaya çıktıktan sonra çalışmanın detaylandırılması için II. kanun analizi de çalışmaya dahil edilmiştir.

Doğrulan bu teorik model öncelikle R134a soğutucu akışkanı için uygulanmış ve arkasından R1234yf soğutucu akışkanı için tekrarlanmıştır. Daha sonra, %0.01'den %0.1'e kadar %0.01'er artışlarla nanoparçacık hacimsel oranları değiştirilerek R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanosöğütücü akışkanları oluşturulmuştur. Bu nanosöğütücü akışkanlar, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıklarında ve 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıklarındaki analizlerde kullanılmıştır. Analizler, mühendislik denklem çözücü (EES) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. R134a ve R1234yf için farklı yoğuşma ve farklı buharlaşma sıcaklıklarındaki COP ve ekserji verimi değerleri (COP and exergy efficiency values at various condensation and evaporation temperatures for R134a and R1234yf)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma, R134a akışkanının kullanımının kısıtlanmasıyla alternatif soğutucu akışkan arayışları çerçevesinde temellendirilmiştir. Bu nedenle öncelikle R134a ve en güçlü alternatifleri arasında yer

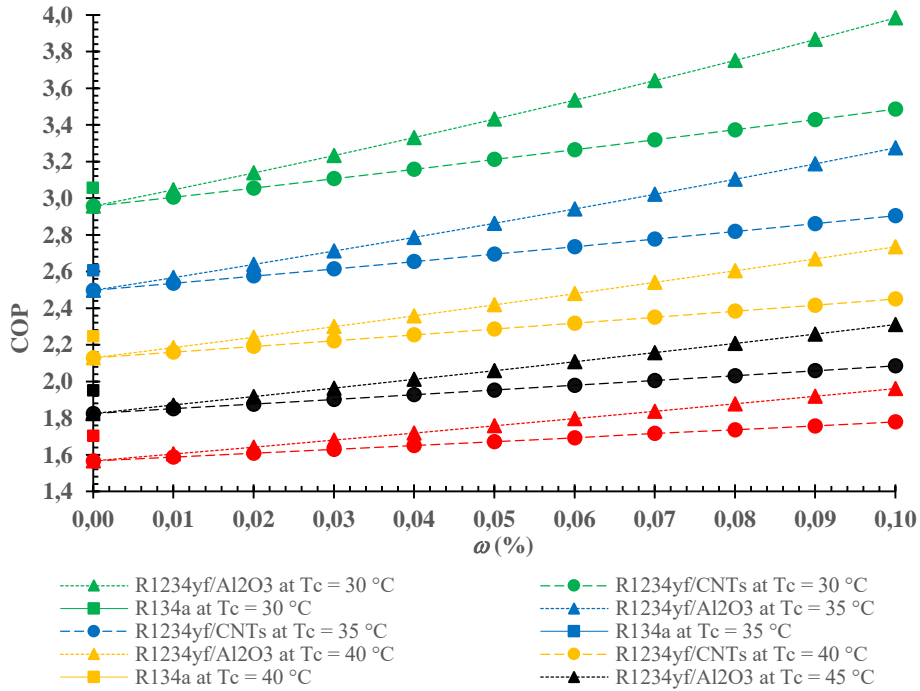
alan R1234yf akışkanının tek başlarına kullanımları durumu için I. ve II. kanun analizleri yapılmıştır. Analizler; buharlaşma sıcaklığı (T<sub>e</sub> = -7 °C) sabit tutularak farklı yoğuşma sıcaklıkları (T<sub>c</sub> = 30, 35, 40, 45 ve 50 °C) için ve yoğuşma sıcaklığı (T<sub>c</sub> = 45 °C) sabit tutularak farklı buharlaşma sıcaklıkları (T<sub>e</sub> = -4, -7 ve -10 °C) için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen

sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’deki sonuçlar incelendiğinde; tüm durumlar için, R134a kullanılan sistem R1234yf kullanılan sistemden hem COP hem de ekserji verimi bakımından daha yüksek bir performansa sahip olduğu görülür. Diğer taraftan, azalan yoğuşma sıcaklıklarında ve artan buharlaşma sıcaklıklarında hem COP değerlerinin hem de ekserji veriminin arttığı görülür.

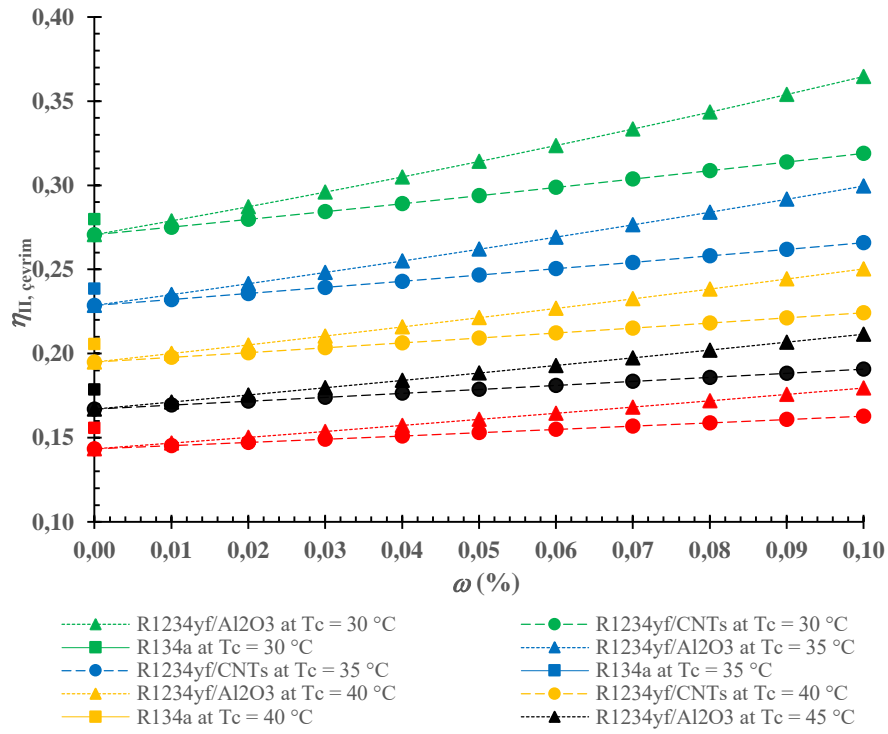
Çalışmada; R134a ve R1234yf akışkanlarının aynı sistemde tek başlarına kullanılmasıyla oluşan yaklaşık %7’lik performans düşüşünün, nanoöğütücü akışkan kullanımıyla telafi edilebileceği termodinamik analizler ile ortaya konmuştur. Termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından yapılan bu analizler; nanoparçacık hacimsel oranı %0.01’den %0.1’e kadar %0.01’er artışlarla on farklı değer için gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 3’te, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

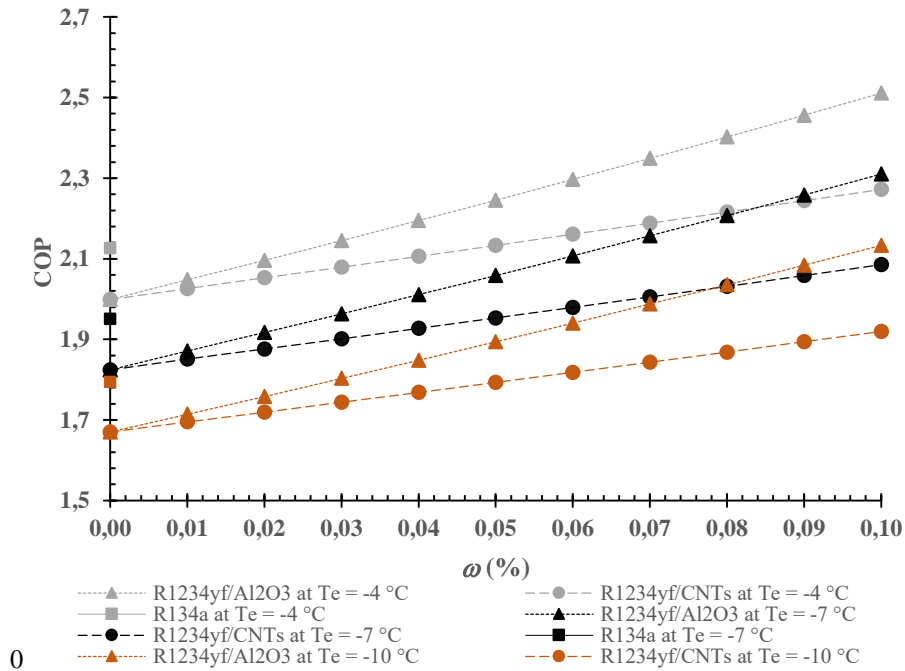
ve R1234yf/CNTs nanoöğütücü akışkanlarının farklı parçacık hacimsel oranlarındaki COP değerleri gösterilmiştir. Şekil 3’te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, COP değerini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT’ye kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs’nin farklı parçacık hacimsel oranlarındaki ekserji verimleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekil 4’te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, ekserji verimini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT’ye kıyasla yine daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Şekil 3’te yer alan COP değerlerinin ve Şekil 4’te yer alan ekserji verimi değerlerinin, aynı buharlaşma sıcaklığı için yoğuşma sıcaklığının düşmesiyle arttığı görülmektedir.



Şekil 3. -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığında farklı yoğuşma sıcaklıkları için COP değerlerinin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of COP values with the nanoparticle volumetric ratio for various condensation temperatures at -7 °C constant evaporation temperature).



Şekil 4. -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığında farklı yoğuşma sıcaklıkları için ekserji veriminin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of exergy efficiency with the nanoparticle volumetric ratio for various condensation temperatures at -7 °C constant evaporation temperature).



Şekil 5. 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığında farklı buharlaşma sıcaklıkları için COP değerlerinin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of COP values with the nanoparticle volumetric ratio for various evaporation temperatures at 45 °C constant condensation temperature).

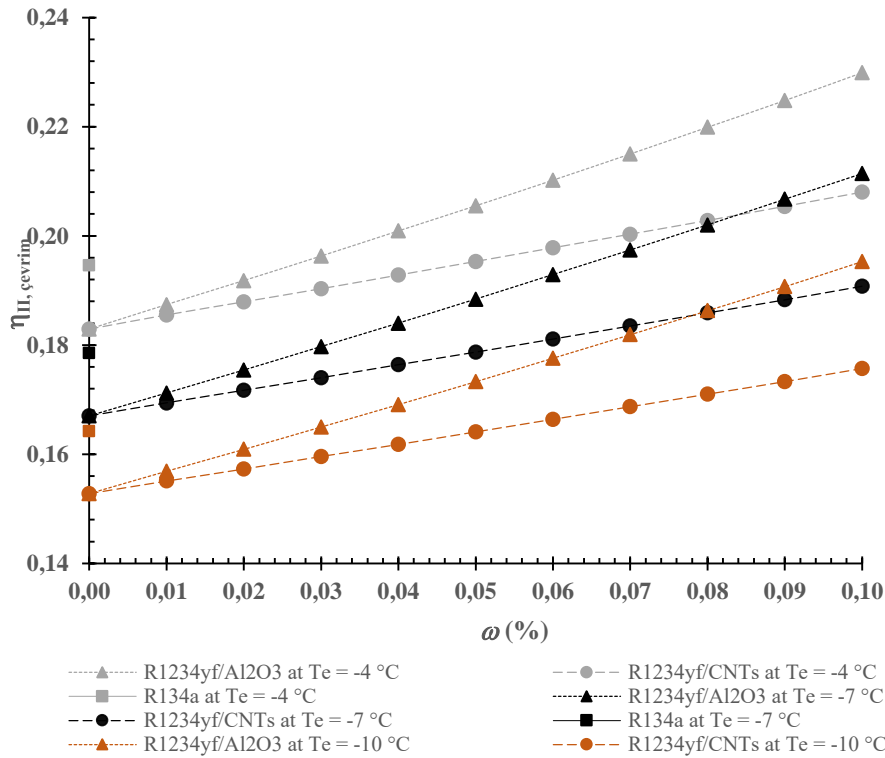


Şekil 5'te, 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının farklı parçacık hacimsel oranlarındaki COP değerleri gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, COP değerini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT'ye kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs'nin farklı parçacık hacimsel oranlarındaki ekserji verimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, ekserji verimini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT'ye kıyasla yine daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Şekil 5'te yer alan COP değerlerinin ve Şekil 6'da yer alan ekserji verimi değerlerinin, aynı yoğuşma sıcaklığı için buharlaşma sıcaklığının yükselmesiyle arttığı görülmektedir.

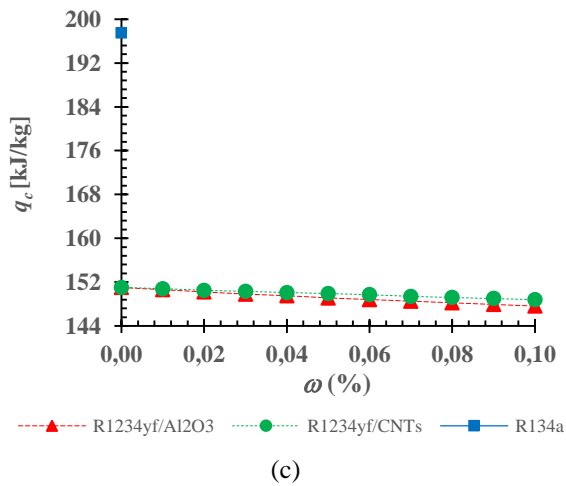
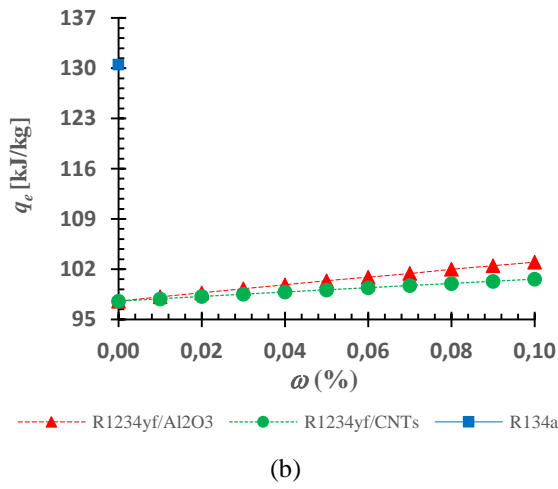
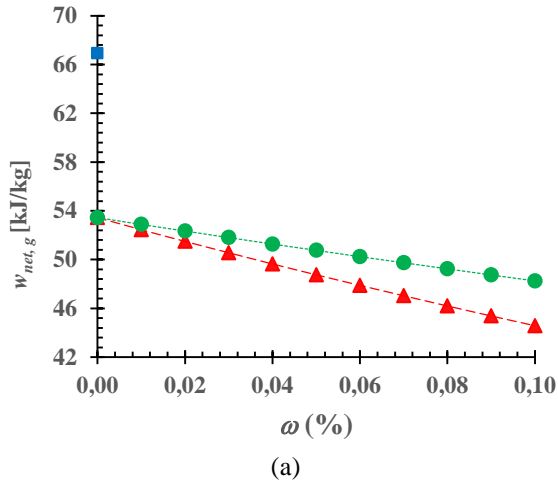
Şekil 3 ve Şekil 5 incelendiğinde COP değerinde, Şekil 4 ve Şekil 6 incelendiğinde ise ekserji veriminde; her iki nanoparçacık için de yaklaşık olarak %0.05 hacimsel oranından itibaren, R134a'nın tek başına kullanıldığı sisteme göre artışın başladığı ve bu artışın, en fazla %18 seviyesine kadar çıktığı

görülmektedir. Böylece, R1234yf'nin tek başına kullanıldığı durumda R134a'ya göre ortaya çıkan ve COP için %6.46, ekserji verimi için ise %6.44 olan performans düşüşlerinin telafi edilebileceği, hatta artış sağlanabileceği görülmektedir.

Analizler neticesinde, nanoparçacık ilavesinin her durumda COP değerinde ve ekserji veriminde artış sağladığı görülmüştür. Değerlendirmeleri kolaylaştırmak ve henüz yeni sayılabilecek nanoşutucu akışkan uygulaması sonuçlarını daha doğru yorumlayabilmek için incelemeler detaylandırılmıştır. Bu kapsamda; sabit buharlaşma (-7 °C) ve sabit yoğuşma (45 °C) sıcaklıkları için, birim akışkan kütlesi başına kompresör enerji tüketimi, buharlaştırıcıdaki ısı geçişi (soğutma etkisi) ve yoğuşturucudaki ısı geçişinin (ısıtma etkisi) nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Buna göre; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacığının ilavesi daha etkin olmakla birlikte, nanoparçacık hacimsel oranının artmasıyla kompresör enerji tüketimi ve yoğuşturucudaki ısı geçişi azalmakta, buna karşın soğutma etkisi artmaktadır. Bu durum, soğutma sistemleri için oldukça önemlidir.



Şekil 6. 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığında farklı buharlaşma sıcaklıkları için ekserji veriminin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of exergy efficiency with the nanoparticle volumetric ratio for various evaporation temperatures at 45 °C constant condensation temperature).



Şekil 7. Sabit yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarında nanoparçacık hacimsel karışım oranına bağlı olarak a) Kompresör enerji tüketimi, b) Soğutma etkisi ve c) Yoğuşturucudaki ısı geçişi (*Depending on the nanoparticle volumetric concentration at constant condensation and evaporation temperatures a) Compressor energy consumption, b) Cooling effect and c) Heat transfer in condenser*).

#### 4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada; ideal bir BSSÇ, termodinamiğin I. ve II. kanunu bakımından teorik olarak incelenmiştir. İncelemelerde öncelikle iş akışkanı olarak tek başına R134a ele alınmış, enerji ve ekserji bakımından analiz edilmiştir. Ardından çevrim aynı şartlarda tek başına R1234yf için analiz edilmiş ve bu iki akışkan performans kriterleri bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmada, R1234yf'nin kullanılması durumunda performans düşüşü saptanmış ve bu performans düşüşünün, R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının kullanımıyla önlenilebileceği öngörülmüştür. R134a ve R1234yf'nin tek başlarına kullanımı ile R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs'nin kullanımının, termodinamiğin I. ve II. yasaları bakımından mukayese edildiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- R134a yerine tek başına R1234yf kullanımı, sistemin COP değerinde ve ekserji veriminde düşüğe neden olmaktadır. Bu düşüş miktarları, incelenen farklı buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıkları için COP değerinde %3.24 ila %7.99 ve ekserji veriminde %3.25 ila %7.90 aralığında hesaplanmıştır.

- Beklendiği gibi, sabit buharlaşma sıcaklığında, yoğuşma sıcaklığının mümkün olduğunca düşük tutulması, sistem performansını artırmaktadır.

- Yine beklediği gibi, sabit yoğuşma sıcaklığında, buharlaşma sıcaklığının mümkün olduğunca yüksek tutulması, sistem performansını artırmaktadır.

- R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının kullanımı sistemin performansını iyileştirmektedir. Bu iyileşme, R134a'nın tek başına kullanımına kıyasla COP değeri ve ekserji verimi için sırasıyla, R1234yf/%0.1Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanımında %18.46 ve %18.43; R1234yf/%0.1CNTs kullanımında ise %6.92 ve %6.89 olmaktadır. Bu artışlar, kıyaslanmanın R1234yf'nin tek başına kullanılması durumu için yapılırsa, R1234yf/%0.1Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanımında %26.64 ve %26.59; R1234yf/%0.1CNTs kullanımında ise %14.31 ve %14.25 gibi çok daha yüksek oranlarda gerçekleşmektedir.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça COP değeri ve ekserji verimi de artmaktadır.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça kompresör enerji tüketimi azalmaktadır.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça soğutma etkisi artmaktadır.
- Kompresör enerji tüketimindeki azalma miktarı, soğutma etkisindeki artış miktarından fazla olduğundan, nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça yoğuşturucudaki ısı geçişi düşmektedir.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi CNT ilavesine göre, COP değeri ve ekserji verimi bakımından daha yüksek bir artış sağlamaktadır. Bu durum, çalışma kapsamındaki tüm analizler için geçerlidir.

Özetle bu teorik çalışmada; nanosoğutucu akışkan kavramına kapsamlı bir bakış sunulmuş, pratik bir yaklaşımla bir BSSS için ortaya somut veriler konmuştur. Nanosoğutucu akışkanların, BSSS’lerde kullanılmaya değer bir konumda oldukları anlaşılmıştır. Ancak yine de nanosoğutucu akışkanlar konusu araştırılmaya muhtaçtır. Önemli öngörüler kazandırabilen teorik çalışmalar deneysel çalışmalarla desteklenmelidir. Ayrıca, daha fazla sayıda alternatif soğutucu akışkan ve nanoparçacık için çalışmalar yapılmalıdır. Bu teorik çalışma; termodinamik özellikleri hakkında literatürde kısıtlı bilgi bulunan nanosoğutucu akışkanların BSSS’ler için önemli bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir. Araştırmacıların bu potansiyelden yararlanmaları soğutma uygulamaları açısından önem arz etmektedir. Gelecek çalışmalarda; BSSS’lerde tek tür nanoparçacık kullanımının yanı sıra birden fazla türde nanoparçacık (hibrit) kullanımının incelenmesinin araştırılmaya değer olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, R134a gibi soğutucu akışkanlara alternatif olan R1234yf haricindeki soğutucu akışkanların da nanosoğutucu olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

#### SİMGELER (SYMBOLS)

$h$	: Özgül entalpi	[kJ/kg]
$P$	: Basınç	[kPa]
$q$	: Isı geçişi	[kJ/kg]
$s$	: Özgül entropi	[kJ/(kg K)]
$T$	: Sıcaklık	[°C] veya [K]
$w$	: Özgül iş	[kJ/kg]

#### Yunan simgeleri (Greek symbols)

$\rho$	: Yoğunluk	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	: Özgül hacim	[m <sup>3</sup> /kg]
$\omega$	: Hacimsel oran	[%]
$\eta$	: Verim	[%]

#### Alt indisler (Subscripts)

$c$	: Yoğuşturucu
$e$	: Buharlaştırıcı
$g$	: Giren
$H$	: Yüksek
$izen$	: İzentropik
$L$	: Düşük
$np$	: Nanoparçacık
$nr$	: Nanosoğutucu akışkan
$pr$	: Yalın haldeki soğutucu akışkan

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmada yazarları, ‘1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı’ kapsamındaki 119M074 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EC) No. 842/2006.
- [2] A.G. Devecioğlu and V. Oruç, “Characteristics of some new generation refrigerants with low GWP,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1452-1457, 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.258
- [3] A.G. Devecioğlu and V. Oruç, “A comparative energetic analysis for some low-GWP refrigerants as R134a replacements in various vapor compression refrigeration systems,” *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 51-61, 2018.
- [4] M. Rashed, O. Huzayyin, M.A. Kassem, and S. Kaseb, “A novel thermodynamic design model of a new HFO refrigerant single phase vapor jet cooling system,” *International Journal of Refrigeration*; vol. 110, pp. 153-167, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.10.029
- [5] L.P.M. Colombo, A. Lucchini, and L. Molinaroli, “Experimental analysis of the use of R1234yf and R1234ze(E) as drop-in alternatives of R134a in a water-to-water heat pump,” *International Journal of Refrigeration*, 115, pp. 18-27, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.004

- [6] Z. Li, K. Liang, and H. Jiang, "Experimental study of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in an oil free refrigeration system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 153, pp. 646-654, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.050
- [7] H.E.A.S. Mohamed, K. Bilen, K. Dağdır, and E. Arcaklıoğlu, "Investigation of the effect of nanorefrigerants on performance of the vapor compression refrigeration cycle: A review study," *1<sup>st</sup> International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering (ICAMMEN)*, pp. 79-87, 8-9 November, Ankara/Turkey, 2018.
- [8] A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh, "Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3656-3669, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.097
- [9] S.S. Sanukrishna, M. Murukan, and P.M. Jose, "An overview of experimental studies on nanorefrigerants: Recent research, development and applications," *International Journal of Refrigeration*, vol. 88, pp. 552-577, 2018. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.03.013
- [10] A. Kasaeian, S.M. Hosseini, M. Sheikhpour, O. Mahian, W.M. Yan, and S. Wongwises, "Applications of eco-friendly refrigerants and nanorefrigerants: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 91-99, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.033
- [11] O.O. Ajayi, D.E. Ukasoanya, M. Ogbonnaya, E.Y. Salawu, I.P. Okokpujie, S.A. Akinlabi, E.T. Akinlabi, and F.T. Owoeye, "Investigation of the effect of R134a/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanofluid on the performance of a domestic vapour compression refrigeration system," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 112-117, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.012
- [12] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, J. Gill, I.P. Okokpujie, and O.E. Atiba, "Performance of an iso-butane driven domestic refrigerator infused with various concentrations of graphene based nanolubricants," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1146-1151, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.069
- [13] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, J. Gill, O.E. Atiba, I.P. Okokpujie, and A.A. Atayero, "Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system with 15 nm TiO<sub>2</sub>-R600a nano-refrigerant as the working fluid," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1222-1227, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.079
- [14] G. Jatinder, O.S. Ohunakin, D.S. Adelekan, O.E. Atiba, A.B. Daniel, J. Singh, and A.A. Atayero, "Performance of a domestic refrigerator using selected hydrocarbon working fluids and TiO<sub>2</sub>-MO nanolubricant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160 (114004), pp. 1-12, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114004
- [15] T.O. Babarinde, S.A. Akinlabi, and D.M. Madyira, "Energy performance evaluation of R600a/MWCNT-nanolubricant as a drop-in replacement for R134a in household refrigerator system," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 639-647, 2020. doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.132
- [16] T.O. Babarinde, S.A. Akinlabi, D.M. Madyira, and F.M. Ekundayo, "Enhancing the energy efficiency of vapour compression refrigerator system using R600a with graphene nanolubricant," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1-10, 2020. doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.031
- [17] M.R. Salem, "Performance enhancement of a vapor compression refrigeration system using R134a/MWCNT-oil mixture and liquid-suction heat exchanger equipped with twisted tape turbulator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 120, pp. 357-369, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.09.009
- [18] V. Nair, A.D. Parekh, and P.R. Tailor, "Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system using R134a/Nano-oil mixture," *International Journal of Refrigeration*, vol. 112, pp. 21-36, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.12.009
- [19] K. Mohan, S. Sundararaj, K.G. Kannan, and A. Kannan, "Experimental analysis on refrigeration system using CNT, gold & HAuCl<sub>4</sub> nano fluids," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 360-366, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.156
- [20] S.S. Chauhan, "Performance evaluation of ice plant operating on R134a blended with varied concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>/PAG composite nanolubricant by experimental approach," *International Journal of Refrigeration*, vol. 113, pp. 196-205, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.021
- [21] D.F.M. Pico, L.R.R. Silva, O.S.H. Mendoza, and E.P.B. Filho, "Experimental study on thermal and tribological performance of diamond nanolubricants

applied to a refrigeration system using R32,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 152 (119493). pp. 1-11, 2020.

doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119493

[22] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, M.H. Oladeinde, G. Jatinder, O.E. Atiba, M.O. Nkiko, and A.A. Atayero, “Performance of a domestic refrigerator in varying ambient temperatures, concentrations of TiO<sub>2</sub> nanolubricants and R600a refrigerant charges,” *Heliyon*, vol. 7 (e06156), pp. 1-13, 2021.

doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06156

[23] Y. Joshi, D. Zanwar, and S. Joshi, “Performance investigation of vapor compression refrigeration system using R134a and R600a refrigerants and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle based suspension,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 1511-1519, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.732

[24] A. Senthilkumar and A. Anderson, “Experimental investigation of SiO<sub>2</sub> nanolubricants for R410A vapour compression refrigeration system,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3613-3617, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.659

[25] M. Devarajan, N.P. Krishnamurthy, M. Balasubramanian, B. Ramani, S. Wongwises, K.A. El-Naby, and R. Sathyamurthy, “Thermophysical properties of CNT and CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid nanofluid,” *Micro & Nano Letters*, vol. 13, pp. 617-621, 2018. doi: 10.1049/mnl.2017.0029

[26] M. Aktas, A.S. Dalkilic, A. Celen, A. Cebi, O. Mahian, and S. Wongwises, “A theoretical comparative study on nanorefrigerant performance in a single-stage vapor-compression refrigeration cycle,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, 2015.

[27] V.P.S. Kumar, A. Baskaran, and K.M. Subramanian, “A performance study of vapour compression refrigeration system using ZrO<sub>2</sub> nano particle with R134a and R152a,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 6, no. 12, 410-421, 2016.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

