

## Teşhir Tipi Soğutucular İçin CO<sub>2</sub> Soğutkanlı Eko-Tasarım Dış Ünite Geliştirilmesi

Süleyman ERTEN<sup>1</sup>  Melis ÖDER<sup>1\*</sup>  Burak Can TEMÜR<sup>2</sup>  Buğra KOÇ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ankara, Türkiye.

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye.

### Article Info

Research article  
Received: 28/02/2024  
Revision: 21/03/2024  
Accepted: 25/03/2024

### Keywords

Refrigeration  
Refrigerated Display  
Cabinet  
Carbon Dioxide  
Refrigerant

### Makale Bilgisi

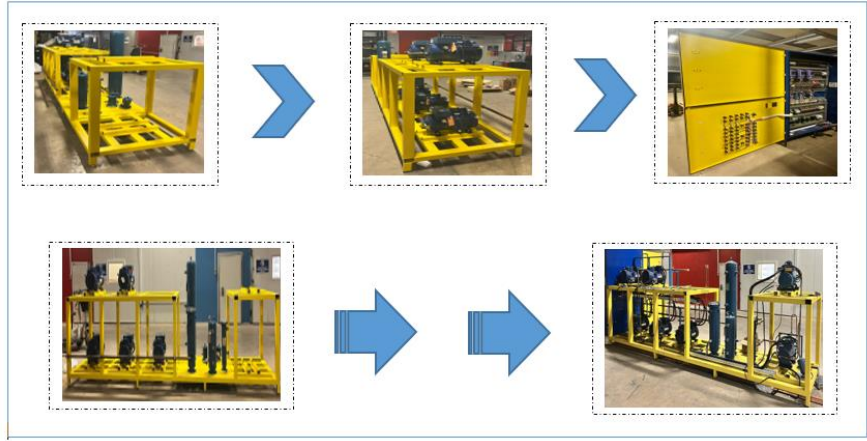
Araştırma makalesi  
Başvuru: 28/02/2024  
Düzeltilme: 21/03/2024  
Kabul: 25/03/2024

### Anahtar Kelimeler

Soğutma  
Teşhir Tipi Soğutucu  
Karbondioksit  
Soğutucu Akışkan

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çevre dostu CO<sub>2</sub> soğutkanlı eko-tasarım dış ünite, farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucuları senkronize çalıştırarak enerji verimliliği sağlar. Testler PS ve NS sınıflarında başarıyla tamamlanmış, enerji sınıfları C ve E olarak belirlenmiştir. Tek sistemle farklı sıcaklık sınıfları sunulur. / The eco-designed outdoor unit with environmentally friendly CO<sub>2</sub> refrigerant provides energy efficiency by synchronized operation of refrigerated display cabinets in different temperature classes. Tests were successfully completed in PS and NS classes and energy classes were determined as C and E. Different temperature classes are offered with a single system.



Şekil A: CO<sub>2</sub> dış ünite yapım aşaması / Figure A: CO<sub>2</sub> outdoor unit construction phase

### Önemli noktalar (Highlights)

- Çevre dostu CO<sub>2</sub> (R744) kullanımıyla çevresel etkiler azaltılır ve enerji verimliliği sağlanır. Senkronize çalışma özelliği sayesinde farklı sıcaklık sınıflarındaki soğutucular tek bir dış üniteyle yönetilir. / The use of environmentally friendly CO<sub>2</sub> (R744) reduces environmental impact and ensures energy efficiency. Synchronized operation allows coolers in different temperature classes to be managed by a single outdoor unit.

**Amaç (Aim):** Çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO<sub>2</sub> kullanarak, farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucular için enerji verimli ve çevre dostu bir sistem tasarlamak ve bu sistemle süpermarket gibi satış alanlarında farklı sıcaklık ihtiyaçlarını tek bir sistemle karşılayabilmektir. / Design an energy efficient and environmentally friendly system for display type coolers in different temperature classes using CO<sub>2</sub>, an environmentally friendly natural refrigerant, and to meet different temperature needs in sales areas such as supermarkets with a single system.

**Özgünlük (Originality):** Çalışmanın özgün yanı, çevre dostu CO<sub>2</sub> soğutkanının kullanılmasıyla farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucuların senkronize çalıştırılmasını sağlayan eko-tasarıma odaklanmasıdır. / What is unique about the study is its focus on eco-design, which enables the synchronized operation of refrigerated display cabinets of different temperature classes through the use of environmentally friendly CO<sub>2</sub> refrigerant.

**Bulgular (Results):** CO<sub>2</sub> (R744) kullanımıyla çevresel etkiler azaltılmıştır. Testler PS ve NS sınıflarındaki soğutucular için başarıyla tamamlanmış, enerji sınıfları belirlenmiştir. / Environmental impact is reduced through the use of CO<sub>2</sub> (R744). Tests were successfully completed for coolers in PS and NS classes and energy classes were determined.

**Sonuç (Conclusion):** CO<sub>2</sub> (R744) kullanımıyla çevre dostu bir soğutma sistemi başarıyla geliştirilmiştir. Senkronize çalışma özelliği sayesinde farklı sıcaklık sınıflarındaki soğutucuların yönetimi kolaylaştırılmıştır. / An environmentally friendly cooling system has been successfully developed with the use of CO<sub>2</sub> (R744). Synchronized operation simplifies the management of coolers in different temperature classes. Tests have confirmed energy efficiency and performance for PS and NS class refrigerants.



## Teşhir Tipi Soğutucular İçin CO<sub>2</sub> Soğutkanlı Eko-Tasarım Dış Ünite Geliştirilmesi

Süleyman ERTEN<sup>1</sup> Melis ÖDER<sup>1\*</sup> Burak Can TEMÜR<sup>2</sup> Buğra KOÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ankara, Türkiye.

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 28/02/2024  
Düzeltilme: 21/03/2024  
Kabul: 25/03/2024

### Anahtar Kelimeler

Soğutma  
Teşhir Tipi Soğutucu  
Karbondiyoksit  
Soğutucu Akışkan

### Öz

Enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılması ve enerjinin verimli kullanımı ekolojik denge açısından önemlidir. Soğutma sistemlerindeki standartlar ve yönetmelikler, sera etkisiyle küresel ısınmayı artıran soğutucu akışkanların kullanımını sınırlar. Günümüzde çevre dostu soğutucu akışkanlar tercih edilmekte olup, özellikle karbondiyoksit CO<sub>2</sub> (R744), KIP değerinin 1, ODP değerinin 0 olması aynı zamanda yanma ve tutuşma özelliğine sahip olmamakla birlikte toksit içerikli herhangi bir madde içermemesi nedeniyle önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu anlamda çalışmada, pozitif sıcaklık (PS) (-1 °C / +5 °C) ve negatif sıcaklık (NS) (-15 °C / -30 °C) sınıflarındaki teşhir tipi soğutucular için çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO<sub>2</sub> (R744) kullanılarak, birden fazla kompresörü içeren eko-tasarım uygun kompakt bir dış ünite tasarlanmıştır. Tasarlanan dış ünite, süpermarketlerde birden fazla farklı sıcaklık sınıfındaki TTS'leri senkronize olarak çalıştırabilme özelliğine sahiptir. Tasarlanan dış üniteli merkezi (remote) soğutucu TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı kapsamında test odalarında test edilmiş ve PS-NS kompresörleri ve multi-ejektör sistemi kullanılarak performansı analiz edilmiştir. PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için toplam enerji tüketimleri sırasıyla 27,86 kWh/gün ve 36,1 kWh/gün olarak hesaplanmış ve enerji sınıfları ise sırasıyla C ve E sınıfı olarak belirlenmiştir. Bu soğutucular için maksimum ve minimum paket sıcaklıkları sırasıyla -0,8 / +5 °C ve -16 / -27 °C aralığındadır. Yapılan analizler neticesinde istenilen farklı sıcaklıklardaki soğutma yükleri karşılanmış ve kabin içinde soğutulan ürünlerin standart kapsamında belirtilen sıcaklık sınıfları sağlanmıştır. Böylece, bu tasarım ile süpermarket vb. satış alanlarında teşhir tipi soğutucularda tek bir sistem ile farklı sıcaklık sınıflarını sağlayan CO<sub>2</sub> soğutkanlı bir soğutma sistemi ortaya konmuştur.

## Development of Eco-Design Outdoor Unit with CO<sub>2</sub> Refrigerant for Refrigerated Display Cabinets

### Article Info

Research article  
Received: 28/02/2024  
Revision: 21/03/2024  
Accepted: 25/03/2024

### Keywords

Refrigeration  
Refrigerated Display  
Cabinet  
Carbon Dioxide  
Refrigerant

### Abstract

Reducing the environmental impact of energy systems and the efficient use of energy are important for ecological balance. Standards and regulations in refrigeration systems limit the use of refrigerants that increase global warming with greenhouse effect. Nowadays, environmentally friendly refrigerants are preferred and especially carbon dioxide CO<sub>2</sub> (R744) has become an important alternative because it has a KIP value of 1, ODP value of 0, and does not contain any toxic substances as well as not having combustion and ignition properties. In this sense, in this study, a compact outdoor unit suitable for eco-design including more than one compressor was designed using CO<sub>2</sub> (R744), an environmentally friendly natural refrigerant for refrigerated display cabinets in positive temperature (PT) (-1 °C / +5 °C) and negative temperature (NT) (-15 °C / -30 °C) classes. The designed outdoor unit is capable of synchronized operation of multiple TTSs of different temperature classes in supermarkets. Remote cooler with the designed outdoor unit was tested in test chambers within the scope of TS EN ISO 23953-2: 2017 standard and its performance was analyzed using PS-NS compressors and multi-ejector system. Total energy consumption for PT and NT class coolers (indoor units) was calculated as 27,86 kWh/day and 36,1 kWh/day respectively and energy classes were determined as C and E class respectively. The maximum and minimum package temperatures for these coolers are in the range of -0.8 / +5 °C and -16 / -27 °C, respectively. As a result of the analyzes, the cooling loads at different desired temperatures were met and the temperature classes specified in the standard for the products cooled in the cabinet were met. Thus, with this design, a CO<sub>2</sub> refrigerant cooling system that provides different temperature classes with a single system in refrigerated display cabinets in sales areas such as supermarkets etc. has been introduced.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıdaların soğuk muhafazasında soğuk zincir olarak tanımlanan konu çok kapsamlı olup içerisinde birçok soğutucu tipi vardır. Soğuk zincirin halkalarından biride çoğunlukla süpermarketlerde kullanılan teşhir tipi soğutuculardır (TTS). Çevresel sorunların başında gelen iklim değişikliği, 2009/125/EC (Eko-Tasarım Yönetmeliği) kapsamında üretim ve tüketim süreçlerinin gözden geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, TTS' ler için çevresel etkilerin azaltılması ve ekotasarım gereksinimlerinin karşılanması önem arz etmektedir. Gün geçtikçe artan düzenlemelerle birlikte çevresel duyarlılık gereksinimleri de artmaktadır.

TTS' lerin tasarımında çevresel etkilerin azaltılması ve hammadde/enerji kullanımının minimize edilmesi, ekotasarım gereksinimlerine uygun hareket etmek anlamına gelmektedir. Ülkelerin 2020 yılında Paris Anlaşması ile ortak olarak belirledikleri küresel sıcaklık artışı 2 °C' nin altında tutma hedefi göz önüne alındığında, yüksek enerji verimine sahip çevreci soğutucu akışkanlı TTS' lerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, CO<sub>2</sub> (R744) soğutucu akışkan kullanılan soğutma sistemleri, düşük küresel ısınma potansiyeli nedeniyle öne çıkmaktadır.

CO<sub>2</sub>'nin özellikleri, diğer geleneksel soğutucu akışkanlardan belirgin bir şekilde farklıdır. Özellikle, CO<sub>2</sub>'in düşük kritik nokta sıcaklığı (31,06 °C) ve yüksek basınç (73,8 bar) sahip olması dikkat çeker. CO<sub>2</sub>' nin uygulanmasını sınırlayan başka bir faktör ise -56,6 °C sıcaklıktaki yüksek üçlü noktası ve buna eşlik eden 5,1 bar basınçtır [1].

R744 soğutma sistemleri, genellikle orta ve düşük sıcaklıklı ılıman ile soğuk iklim kuşaklarında daha etkili bir performans sergilemektedir. Son dönemde, CO<sub>2</sub>'nin soğutucu akışkan olarak kullanımı, soğuk içecek otomatları, süpermarketler, soğuk depolar, gıda üretim ve işleme tesisleri, endüstriyel dondurma üretim makineleri, ısı pompaları ve araç klima sistemleri gibi çeşitli uygulama alanlarında hızla artmaktadır [1]. Konu ile ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde:

Dai ve ark. (2024) ticari süpermarketlere yönelik soğutma sistemlerinde doğal bir çalışma akışkanı olarak karbondioksit uygulamasını geliştirmek için kademeli mekanik alt soğutma kavramı araştırılmıştır. Önerilen potansiyel çözümler arasında çok aşamalı, mekanik alt soğutmalı CO<sub>2</sub> sistemi konfigürasyonu bulunmaktadır. Bu sistemler için ekserji, karbon ayak izi ve maliyet performansı göz önünde bulundurularak bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmış ve bu sistemler

temel bir CO<sub>2</sub> güçlendirici soğutma sistemi ve geleneksel bir R404A sistemi ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme, Çin genelinde farklı iklim bölgelerinde yer alan sekiz şehir için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı kullanımının geri dönüşü olmayan kayıpları etkili bir şekilde azalttığını ve CO<sub>2</sub> güçlendirici soğutma sisteme kıyasla daha yüksek yıllık ekserji verimliliğine yol açtığını göstermektedir. Üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı konfigürasyonu, CO<sub>2</sub> güçlendirici soğutma sistemine göre %11,92-18,48 oranında daha yüksek ekserji verimliliği sergilemektedir. Ayrıca, üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı sistem kullanıldığında Haikou'da yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) % 6,87 oranında azalmaktadır ve bu da daha düşük karbon emisyonuna işaret etmektedir. Sonuç olarak, çok aşamalı özel mekanik alt soğutma sistemleri, özellikle üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı konfigürasyonu, üstün emisyon azaltma performansı ve temel sisteme kıyasla daha düşük yaşam döngüsü maliyeti nedeniyle ılık veya sıcak bölgelerdeki uygulamalar için daha uygun olduğu görülmektedir [2]. Sengupta ve ark. (2023) süpermarketlerin verimliliğini artırmak ve BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini desteklemek için soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde yenilikler yaparak karbon ayak izlerini azaltma ihtiyacını araştırmışlardır. Çalışma, teorik kanıt için gerçek bileşen verilerini kullanarak ve matematiksel modeli deneysel verilerle doğrularak yeni bir çift ejektör tabanlı CO<sub>2</sub> soğutma konfigürasyonunu tanıtmaktadır. Önerilen sistem, 28°C / 40°C ortam sıcaklıklarında çalışma için özel bir mekanik alt soğutma tabanlı CO<sub>2</sub> sisteminden % 41,97 ila % 35,38 oranında daha iyi performans göstermektedir. Yıl boyunca performans, çeşitli sıcak ortam konumları için değerlendirilmiş ve geleneksel bir R404A doğrudan genleşme sistemine kıyasla %11,35 oranına varan önemli yıllık enerji tasarrufu göstermiştir. 40°C ortam sıcaklığında yapılan gelişmiş ekserji ve ekonomik analizler, yüksek kademeli kompresörün en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenerek, tersinmezlikleri ve maliyetleri azaltma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bileşenler arasındaki karşılıklı etkileşimler dışsal analiz kullanılarak araştırılmış ve bir genetik algoritma optimizasyonu, mekanik alt soğutma tabanlı CO<sub>2</sub> sistemine kıyasla sistem için %6 oranında daha yüksek ekserjetik performansla sonuçlanmıştır [3]. Chi ve ark. (2023) ejektörlü NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> kaskad soğutma sistemi üzerine odaklanmışlardır. Soğutma çevrimi için

matematiksel bir model oluşturmakta ve termodinamik analiz yoluyla mevcut literatürle karşılaştırmaktadır. Kaskad soğutma sistemi üzerinde ileri ekserji analizi yapılarak bileşenlerin ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Analiz, toplam ekserji yıkımının % 38,674'ünün önlenebilir olduğunu ortaya koymaktadır ve bu da sistemin iyileştirilmesi için yüksek bir potansiyele işaret etmektedir. Ayrıca, toplam ekserji yıkımının %77,77 oranında endojen faktörlerden, %22,22 oranında ise eksojen faktörlerden kaynaklanmaktadır [4]. Li ve ark. (2024), geleneksel sentetik soğutucu akışkanlarla ilgili çevresel kaygıları ele almakta ve çevre dostu bir alternatif olarak karbondioksit ( $CO_2$ ) odaklanmaktadır. Bununla birlikte,  $CO_2$  soğutma sistemleri genellikle verimsiz çalışmaya yol açan önemli kısma kayıplardan muzdariptir. Bunu azaltmak için bu çalışma, sistemin tasarım dışı performansını artırmak için üç kontrol edilebilir ejektörlü bir çoklu ejektör tasarımı önermektedir.  $CO_2$  çoklu ejektörlü soğutma sisteminin deneysel analizi yapılarak çeşitli çalışma koşullarının basınç yükseltme, sürüklenme oranı ve verimlilik dahil olmak üzere çoklu ejektör performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Temel olarak bir genişleme valfi kullanan tek kademeli bir sıkıştırma sistemi ile karşılaştırmalı bir çalışma da gerçekleştirilmiştir. Çoklu ejektör sistemi maksimum 656 kPa basınç artışı göstermektedir. Pratik olarak uygulandığında farklı çalışma koşullarında soğutma performans katsayısını (COP) en üst düzeye çıkaran bir optimum basınç kontrolü stratejisi önerilmiştir. Çoklu ejektör sisteminin soğutma COP değeri, optimum basınç kontrolü stratejisi ile temel sisteme kıyasla % 30,69 oranında iyileşerek verimliliğin arttığını göstermektedir [5].

Yang ve ark. (2023) düşük sıcaklıklarda ejektörlü ve ejektörsüz trans-kritik  $CO_2$  iki aşamalı sıkıştırma soğutma sistemi incelenmiştir. Gaz soğutucu basıncı, gaz soğutucu çıkış sıcaklığı ve elektronik genişleme vanası açıklığının gaz soğutucu ve genel sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, belirli koşullar altında (91 bar gaz soğutucu basıncı, 33 °C çıkış sıcaklığı ve %95 elektronik genişleme vanası açıklığı), transkritik  $CO_2$  iki aşamalı sıkıştırma soğutma sisteminin COP değerinin 0,78'lik bir zirveye ulaştığını göstermektedir. Bu, aynı çalışma koşulları altında ejektörsüz transkritik  $CO_2$  iki aşamalı sıkıştırma soğutma sisteminin COP değerinden 2,28 kat daha yüksektir. Çalışma ejektör için en uygun çalışma aralığını tanımlamakta ve gaz soğutucu basıncının COP üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, bunu elektronik genişleme vanası açıklığı ve gaz soğutucu çıkış sıcaklığının izlediğini

ortaya koymaktadır. Deneysel, belirli elektronik genişleme vanası açma koşullarıyla daha yüksek COP elde edilebileceğini ve genel sistem COP değerini en üst düzeye çıkarmak için optimum bir ara basınç ve gaz soğutucu basıncı olduğunu vurgulamaktadır [6]. Leerbeck ve ark. (2023) Süpermarket soğutma sistemleri için güçlü, büyük ölçekli arıza teşhisi ve optimize edilmiş kontrol sağlamayı amaçlayan bir evaporatör ve onu çevreleyen soğutma kabini için veri odaklı bir gri kutu modeli sunmaktadır. Uygulanabilirliğini göstermek için (Danimarka) bir süpermarketteki on buharlaştırıcıdan bir dakikalık örnekleme çözünürlüğüne sahip veriler kullanılmışlardır. Dolapların dinamik özellikleri ürün eklendikçe ve çıkarıldıkça sürekli değiştiğinden, yaklaşık 2,5 yıllık bir süre boyunca parametreleri her gün için tekrar tahmin etmişlerdir. Tahmin edilen parametrelerin fiziksel anlamı tartışılmakta ve sadece tahmini ısı transfer katsayıları ve ısı kapasiteleri kullanılarak bunların açık veya kapalı dolaplar veya odalar olarak nasıl farklılaştırılabileceği gösterilerek, dolapların karakterizasyonu ve sınıflandırılması için potansiyel uygulamalar gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, modelin fiziksel olarak anlamlı parametreleri tahmin etme açısından sağlam, doğru ve güvenilir olduğunu ve dolayısıyla büyük ölçekli uygulamaya uygun olduğu gösterilmektedir [7]. Yılmaz ve ark. (2020) Transkritik  $CO_2$  soğutma sistemi ile soğutulan kapalı bir vitrin kabini içinde faz değiştiren malzeme (PCM) konumunun etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. PCM konumlarının kabin hava sıcaklığı ve kompresör güç tüketimi üzerindeki etkisi, 24 ve 8 saatlik çalışma aralıklarında test ederek karşılaştırmışlardır. PCM'lerin kabin raflarına kurulmasının hem kabin hava sıcaklığını homojen tutması hem de belirli ortalama sıcaklık seviyelerinde tutması açısından daha avantajlı ve umut verici olduğunu tespit etmişlerdir. Raf kasasındaki PCM için, enerji tasarrufunu PCM kasası olmayana göre % 4,4 daha az bulmuşlardır. Bununla birlikte arka taraftaki PCM, %8 daha fazla enerji tüketimi sağlandığını ve raf kasasında PCM için çalışma süresini 15.8 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada raflarda kullanılan PCM'nin en iyi seçenek olduğu kararına varılmıştır [8]. Sanchez ve ark. (2023) Saf  $CO_2$ 'e alternatif olacak teorik olarak farklı  $CO_2$  bazlı zeotropik bir karışım belirlemişlerdir. Bu karışım yanıcı olmayan GWP si 150 nin altında saf  $CO_2$  den daha yüksek COP sağlayan teorik olarak farklı bir  $CO_2$  karışımıdır. Referans olarak saf  $CO_2$  kullanılarak dikey bir ekran soğutucusunda hazırlanmış ve enerjik olarak iki karışım olan  $CO_2 / R1270$  ve  $CO_2 / R32$  test

edilmiştir. Sonuç olarak, CO<sub>2</sub> karışımlarının enerji tüketimini 25 °C ortam sıcaklığında % 17,2' ye, 30 °C' de %12,2 'ye kadar azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, CO<sub>2</sub> karışımlarıyla elde edilen sonuçlar, saf R1270 ile elde edilenlere en yakın ve aynı çalışma koşullarında R134a'dan daha iyi olduğunu kanıtlamışlardır [9]. Singh ve ark. (2020) yüksek ortam sıcaklığı bağlamında bir Hint süpermarketi için 33 kW soğutma kapasiteli çok ejektörlü CO<sub>2</sub> soğutma sisteminin deneysel değerlendirmesi yapmışlardır. Teçhizat, iki çoklu ejektörden oluşan yeni bir tasarımla donatılmıştır. Bu yeni tasarımla maksimum 5,5 bar basınç artışının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca dahili ısı eşanjörünün desteğiyle genel sistem performansındaki iyileşme görülmektedir. Maksimum COP ve PIR'de gözlemlenen artışlar sırasıyla %7,2 ve %6,2'dir. Evaporatör taşmasının çıkıştaki kızgın ısını %83,84 oranında azalttığı, bunun da toplam PIR'de %6,51 oranında azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, seri çoklu ejektör konfigürasyonuna sahip CO<sub>2</sub> soğutma sisteminin daha yüksek ortam sıcaklıkları için güvenilir bir seçim olduğunu ve daha düşük ortam sıcaklıklarında mevcut sistemlerden daha iyi performans göstermesinin beklendiği öngörülmüştür [10]. Yu ve ark. (2018) CO<sub>2</sub> otomobil klima sisteminin enerji verimliliğini arttırmak için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Teorik analiz, CO<sub>2</sub> ve propan karışımının performansını artırdığını göstermiştir; bu nedenle çeşitli CO<sub>2</sub> -propan kütle oranlarının etkilerini görmek için deneyler yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, teorik sonuçlarla benzer eğilimler gösterdiği görülmüştür. Aynı kompresör hızında sistem COP'sinin, saf CO<sub>2</sub> sisteminden %29,4 daha yüksek olan CO<sub>2</sub> kütle oranının %60'ında en yüksek seviyeye ulaştığı ve hatta R134a sistemiyle eşit seviyeye ulaştığı, optimum basınç ve tahliye sıcaklığının düştüğü göstermişlerdir. Sonuç olarak CO<sub>2</sub> -propan karışımlarının kullanımının, soğutma kapasitesi sabit tutulduğunda bile maksimum %22'lik bir COP artışı sağladığını gösterilmektedir [11].

Bu çalışma kapsamında TTS' ler için aynı anda hem PS hem de NS sınıflarını sağlayabilen dış ünitenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu tasarımın farklı sıcaklık sınıflarındaki TTS' ler ile bağlantıları yapılarak performansının araştırılması amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Deneysel Ekiman (Experimental Equipment)

CO<sub>2</sub>, ozon tabakasına zarar vermeyen ve küresel ısınmaya yol açmayan bir soğutucu akışkandır. Bu özellikleri nedeniyle çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilmektedir. CO<sub>2</sub>, yüksek ısı transfer özelliklerine sahiptir böylece soğutma sistemlerinin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Ayrıca bir başka verim artışı sağlayan ekipman ise çevrimde kullanılan multi-ejektördür.

Multi-ejektörlerin avantajlarından bazıları şunlardır:

- Yüksek basınçlı CO<sub>2</sub>' nin düşük basınçlı CO<sub>2</sub>' ye enerji transferi, sistemdeki enerji verimliliğini artırır ve enerji maliyetlerini düşürür.
- Multi-ejektörler, sistemdeki enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmaya olanak tanır, bu da genel sistem performansını artırır.
- Diğer enerji geri kazanım teknolojilerine kıyasla, multi-ejektörlerin kurulum ve bakım maliyetleri genellikle daha düşüktür.

Bu nedenlerden dolayı, CO<sub>2</sub> soğutucu akışkanlı sistemlerde multi-ejektörler, enerji verimliliğini arttırmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir bileşen haline gelmiştir.

Bu çalışmada, süpermarketlerde yaygın olarak kullanılan PS ve NS sınıflarındaki TTS' ler, çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO<sub>2</sub> kullanılarak, birden fazla kompresörü içeren ekotasarıma uygun kompakt bir dış ünite tasarımı gerçekleştirilmiştir. Multi-ejektörlü, transkritik CO<sub>2</sub> soğutkanlı soğutma sistemi taslak çizimi Şekil 1' de verilmiştir. Tasarlanan dış ünite, TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı altında PS ve NS sıcaklık sınıflarına sahip TTS' lere bağlantısı yapılarak Class 3 (%60 bağıl nem, 25 °C) şartlarında test edilmiştir.

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı iklim sınıfı 3 (25 °C ve %60 Bağıl nem) şartlarında testleri gerçekleştirilen TTS' nin ölçüm cihazlarının özellikleri ve hassasiyetleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Multi-ejektörlü, transkritik CO<sub>2</sub> soğutkanlı soğutma sistemi test ölçü cihazları (Multi-ejector, transcritical CO<sub>2</sub> refrigerant cooling system test meters)

Ölçü aleti	Ölçü aralığı	Doğruluk
Debi ölçer	0–1000 kg/h	±0.1%
Enerji analizörü	0–50 A (220V / 380V)	±0.1%
T-tipi termokupl	233,15–473,15 K	±0.1%
Termohigrometre	0–100 %RH	±1.5%
	273,15–312,15 K	±0.1%
Anemometre	0–2 m/s	±0.1%
Düşük basınç ölçü aleti	0–30 bar	±0.1%
Yüksek basınç ölçü aleti	30–150 bar	±0.1%

## 2.2. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

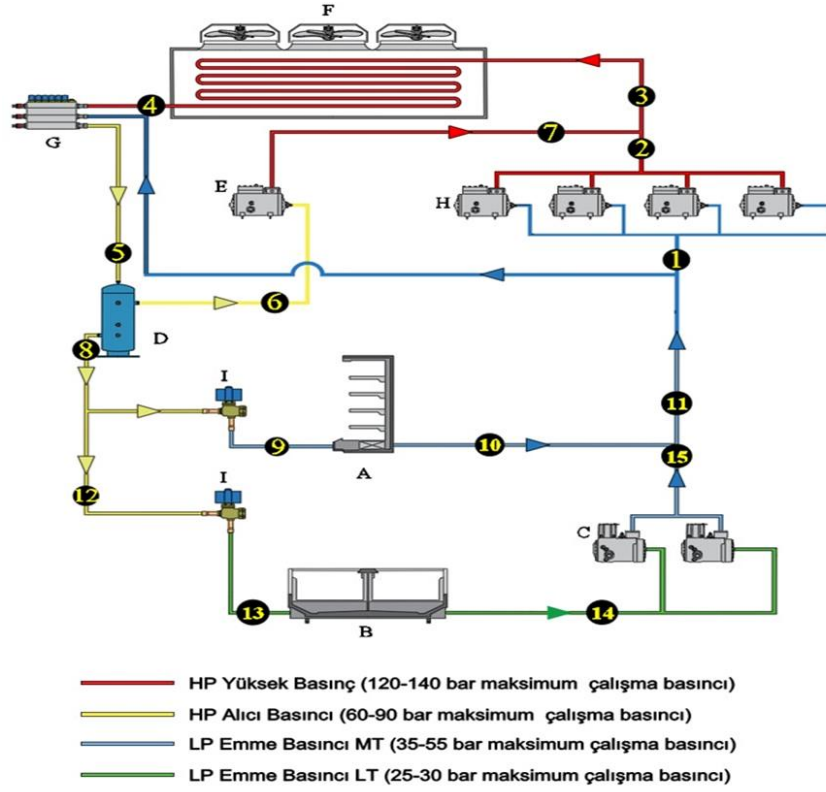
R744 soğutucu akışkanlı, multi-ejektörlü transkritik olarak çalışan bu soğutma sisteminin önemli bileşenlerinden olan yarı hermetik kompresörler hem PS hem de NS sınıflarında kullanılan kompresörlerdir. Ayrıca çevrimdeki bypass kompresörü sayesinde de sistemdeki basınç farkları dengelenerek daha stabil bir çalışma sağlanır.

Soğutucu akışkan PS/NS kompresörlerinde sıkıştırılarak yüksek sıcaklık ve basınçta gaz soğutucusuna gönderilir. Gaz soğutucular, sistemin verimliliğini artırmak ve CO<sub>2</sub>'nin sıcaklığını düşürmek için kullanılır. Transkritik CO<sub>2</sub>'nin faz değişimini kontrol ederek istenilen sıcaklık aralığında tutarlar. Gaz soğutucuda, faz değişimi olmadan havaya ısı geçişi gerçekleşir. Atılan bu ısı ile merkezi enerji sistemlerinde ısıtma yükü karşılanabilir. Gaz soğutucudan çıkan soğutucu akışkan multi-ejektöre gönderilir.

Multi-ejektörler, CO<sub>2</sub> akışkanının basınç düşümünü kullanarak enerji transferini gerçekleştirirler. Yüksek basınçlı CO<sub>2</sub> akışkanı, multi-ejektörün birinci aşamasına beslenir. Bu aşamada, CO<sub>2</sub> akışkanı, düşük basınçlı CO<sub>2</sub> akışkanı ile karıştırılır ve enerji transferi gerçekleşir. Sonuç olarak, düşük basınçlı CO<sub>2</sub> akışkanının basıncı artar ve bu, ikinci birimde kullanılabilir.

Çevrim devamında kullanılan flash tank, sistemin performansını artırmak için kullanılan bir diğer önemli bileşendir. Yüksek basınçlı CO<sub>2</sub>'nin düşük basınçlı CO<sub>2</sub>'ye dönüşümünü sağlar ve bu sayede sistemdeki enerji verimliliği artar. Flash tanktan genleşme elemanına gönderilen soğutkan kısımla işleminden sonra evaporatöre girer. Evaporatörde soğutucu akışkan havadan ısı çekerek havayı soğutur. Evaporatörden çıkan soğutucu akışkan buhar fazında kompresöre gönderilerek çevrim tamamlanır. Sistem tasarımı Şekil 1'de verilmiştir.

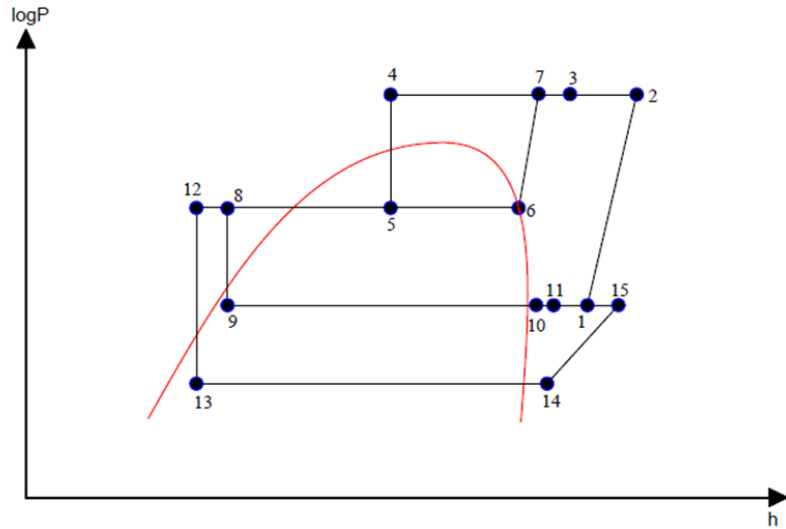




A) PS sınıfı TTS (PT class RDC); B) NS sınıfı TTS (NT class RDC); C) Yarı hermetik kompresörler (NS) (Semi-hermetic compressors) (NT); D) Flash tank (Flash tank); E) Yarı hermetik kompresör (Bypass) (Semi-hermetic compressors) (Bypass); F) Gaz soğutucu (Gas cooler); G) Multi-ejektör (Multi-ejector); H) Yarı hermetik kompresörler (PS) (Semi-hermetic compressors) (PT); I) Genleşme elemanları (Expansion elements)

**Şekil 1.** Multi-ejektörlü, Transkritik CO<sub>2</sub> Soğutkanlı Soğutma Sistemi Taslak Çizimi (Draft Drawing of Cooling System with Multi-ejector, Transcritical CO<sub>2</sub> Refrigerant)

Transkritik çevrime ait logP-h diyagramı Şekil 2' de verilmiştir.



**Şekil 2.** Multi-ejektörlü, Transkritik CO<sub>2</sub> Soğutkanlı Soğutma Sistemi logP-h Akış Diyagramı (LogP-h Flow Diagram of a Multi-ejector, Transcritical CO<sub>2</sub> Refrigerant Cooling System)

R744 soğutucu akışkanı, özellikle transkritik çevrimlerde tercih edilen bir soğutucu akışkandır ve diğer soğutucu akışkanlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek basınç ve sıcaklık seviyelerine ulaşır.

R744'ün transkritik çevriminde kullanılan sistem elemanları, bu özel koşullara uyum sağlamak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Yüksek basınç ve sıcaklık altında etkili bir performans elde etmek için, bu sistem elemanları R744'ün özgün

termodinamik özelliklerini dikkate alacak şekilde özenle seçilir ve entegre edilir [15]. Tasarım parametrelerine ait sıcaklık, bağıl nem, kapasite ve güç değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Multi-ejektörlü, transkritik CO<sub>2</sub> soğutmalı soğutma sistemi tasarım parametreleri (Design parameters of a multi-ejector, transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration system)

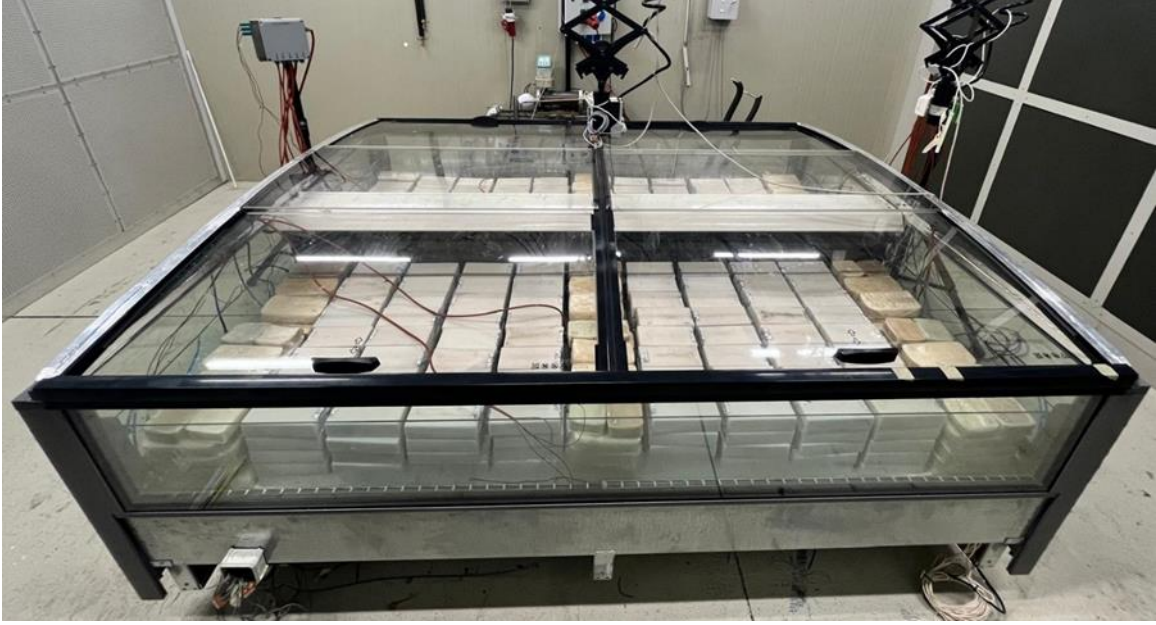
Tasarım Parametreleri	Parametre Değerleri
Evaporasyon sıcaklığı (°C) ~ PS	-5
Evaporasyon sıcaklığı (°C) ~ NS	-35
Evaporatör kapasitesi (kW) ~ PS	5
Evaporatör kapasitesi (kW) ~ NS	4
Kompresör gücü (kW) ~ PS	5,5
Kompresör gücü (kW) ~ NS	4,3
Gaz soğutucu kapasitesi (kW)	20
Test odası sıcaklık (°C)	25
Test odası bağıl nem (%)	60

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı ve iklim sınıfı 3 şartlarında test edilen PS ve NS sınıfına ait TTS' nin görselleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Test edilen PS sınıfı TTS' ye ait görsel (Image of the tested PT class RDC)





Şekil 4. Test edilen NS sınıfı TTS' ye ait görsel (Image of the tested NT class RDC)

### 3. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Teşhir tipi soğutucularda kullanılan mekanik buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimi temel ekipmanları kompresör, evaporatör, kondenser ve genleşme elemanıdır. Transkritik CO<sub>2</sub> çevrimde kondenser yerine gaz soğutucu kullanılır.

Çevrim ekipmanlarının kapasiteleri ve güç tüketimleri aşağıdaki eşitliklerle bulunabilir [12].

Sistemdeki evaporatör kapasitesi eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

Sistemdeki gaz soğutucu kapasitesi eşitlik 2 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{gs} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2)$$

Sistemdeki kompresörün gücü, eşitlik 3 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3)$$

TTS için Toplam Enerji Tüketimi (TET) Eşitlik 4 yardımı ile bulunur [13].

$$TET = SET + GET \quad (4)$$

Eşitlik 4'te belirtilen Soğutma Enerji Tüketimi (SET) değeri ve Günlük Enerji Tüketimi (GET) değeri Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 yardımı ile bulunur [13].

$$SET = (24 - t_{def}) \times \theta_{24-def} \times \frac{T_k - T_c}{0,34 \times T_c} = Q_{toplam} \times \frac{T_k - T_c}{0,34 \times T_c} \quad (5)$$

$t_{def}$  defrost süresini (h),  $\theta_{24-def}$  test koşullarında bir kabinin enerji tüketimini hesaplamak için evaporatör kapasitesini (kWh),  $T_k$  yoğuşma sıcaklığını (K),  $T_c$  soğutma anında evaporasyon sıcaklığını (K),  $Q_{toplam}$  çevreye atılan toplam ısı miktarını (kWh) ifade eder [13].

$$GET = FET + AET + RET + YTIET \quad (6)$$

FET fanların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), AET aydınlatmaların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), RET rezistansların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), YTIET yoğuşma tavaasında bulunan ısıtıcıların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h) ifade eder [13].

TTS' lerin enerji etiketlemede sınıfları belirlenirken, enerji tüketimlerine bağlı olarak hesaplanan enerji verimlilik endeksi (EVE) değeri Eşitlik 7, Eşitlik 8 ve Eşitlik 9 yardımı ile bulunur [14].

EVE, TTS' nin yıllık enerji tüketiminin (YET) standart yıllık enerji tüketimine (SYET) oranlanmasıyla bulunur [14].

$$EVE = \frac{YET}{SYET} \quad (7)$$

YET değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$YET = 365 \times GET \quad (8)$$

SYET değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$SYET = 365 \times P \times (M + N \times Y) \times C \quad (9)$$

Regülasyon (EU) 2019/2018 göre denklem 9 kullanılarak;

- PS sınıfı TTS için M ve N değeri “9,1”, NS sınıfı TTS için M değeri “4” ve N değeri “10,3” alınmıştır. M ve N değerleri farklı tipteki soğutucu ve dondurucular için alınan sabit değerlerdir [14].
- C değeri ise sıcaklık koşulları ve karşılık gelen sıcaklık kat sayısı değerini ifade etmektedir [14]. PS sınıfı TTS için C değeri “1,15”, NS sınıfı TTS için C değeri ise “1” alınmıştır.
- P değeri plug in TTS’ler için 1,10, remote TTS’ler için ise 1 olarak alınır [14]. PS / NS sınıfı TTS için P değeri “1” alınmıştır.

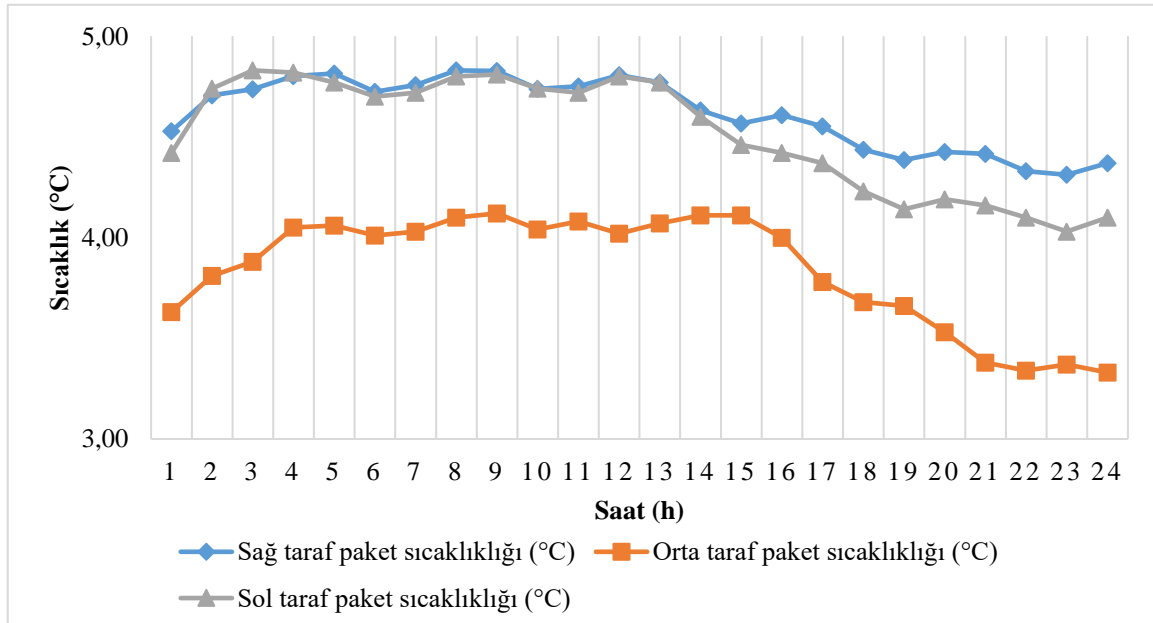
- Y değeri, toplam teşhir alanını (TTA) ifade etmektedir [14]. PS sınıfı TTS için Y (TTA) değeri “6,61 m<sup>2</sup>”, NS sınıfı TTS için Y (TTA) değeri “6,2 m<sup>2</sup>” olarak hesaplanmıştır.

- PS sınıfı TTS için SYET değeri “29068 kWh/yıl”, NS sınıfı TTS için SYET değeri “24769 kWh/yıl” olarak hesaplanmıştır.

Denklem 7 ve 8 kullanılarak PS sınıfı TTS için EVE değeri “34,98”, NS sınıfı TTS için EVE değeri “53,2” olarak hesaplanmıştır.

#### 4. BULGULAR (RESULTS)

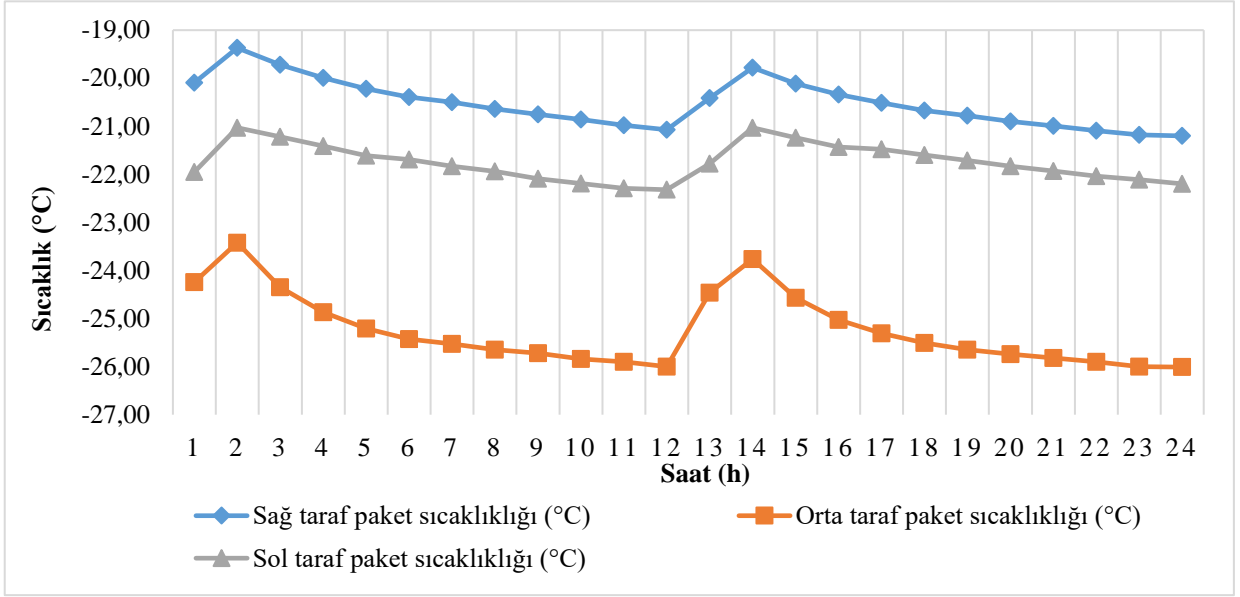
TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına ve iklim sınıfı 3 koşullarına uygun test edilen PS sınıfı ait TTS için sol, orta ve sağ taraf paket sıcaklık grafiği Şekil 5’te verilmiştir. Bu grafik sonuçlarına göre test paketlerinin sıcaklık değerleri standarta göre uygun aralıkta (-1 °C / +5 °C) olduğu görülmektedir.



Şekil 5. PS sınıfı sahip TTS’ nin sağ, orta ve sol taraf ortalama paket sıcaklıkları (Right, center and left side average package temperatures of RDC with PT class)

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına ve iklim sınıfı-3 koşullarına uygun test edilen NS sınıfına ait TTS için sol, orta ve sağ taraf ortalama paket sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 6’da verilmiştir. Elde edilen test sonuçları, sıcaklık değerlerinin

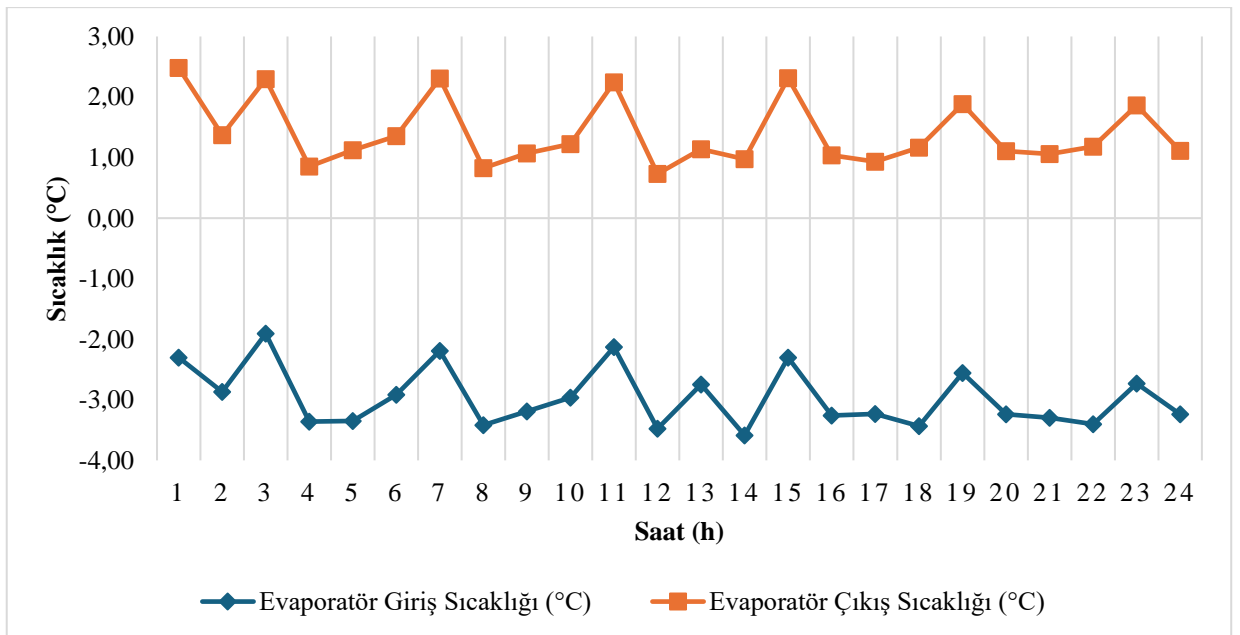
standarta uygun olarak istenilen sıcaklık aralıklarında (-15 °C / -30 °C) olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. NS sınıfı TTS’ nin sağ, orta ve sol taraf ortalama paket sıcaklıkları (Right, center and left side average package temperatures of NT class RDC)

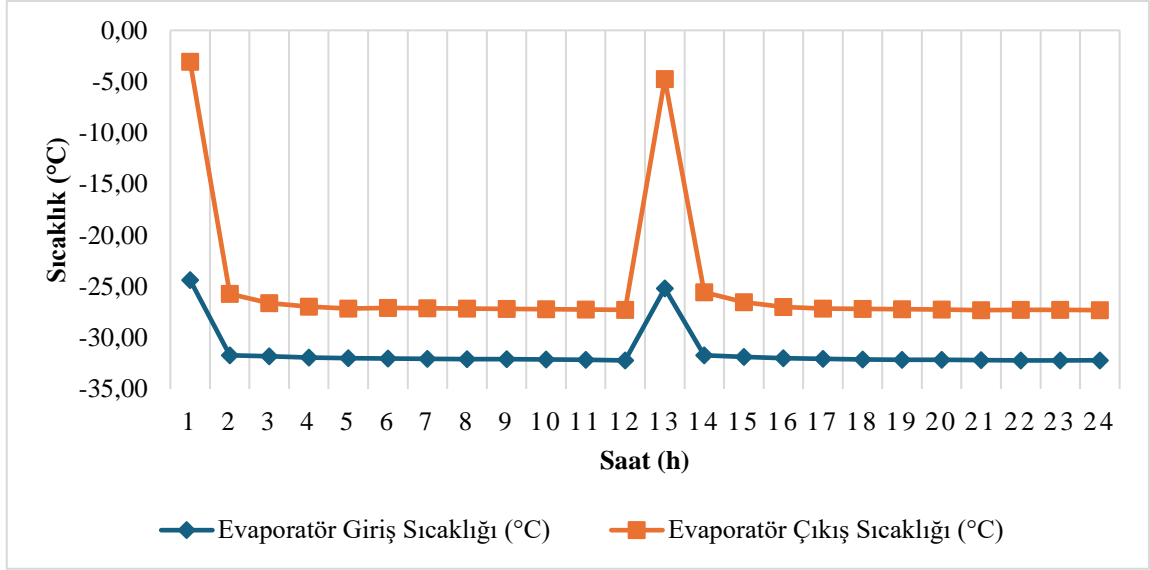
Gerçekleştirilen testlerde, PS ve NS sınıflarına ait teşhir tipi soğutucu kabinlerin sol, orta ve sağ bölgelerindeki ortalama paket sıcaklıkları ölçülerek grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde görülen pik noktalarının sebebi TTS’nin defrost esnasında soğutma işlemini durdurup paket sıcaklıklarının anlık yükselmesidir.

PS sınıfına ait TTS’lerin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri Şekil 7’ de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında PS sınıfına ait TTS’nin evaporasyon değeri maksimum -4 °C olarak ölçülmüş olup test edilen kapılı bir soğutucu olduğu için soğutma kapasitesi yeterli seviyededir.



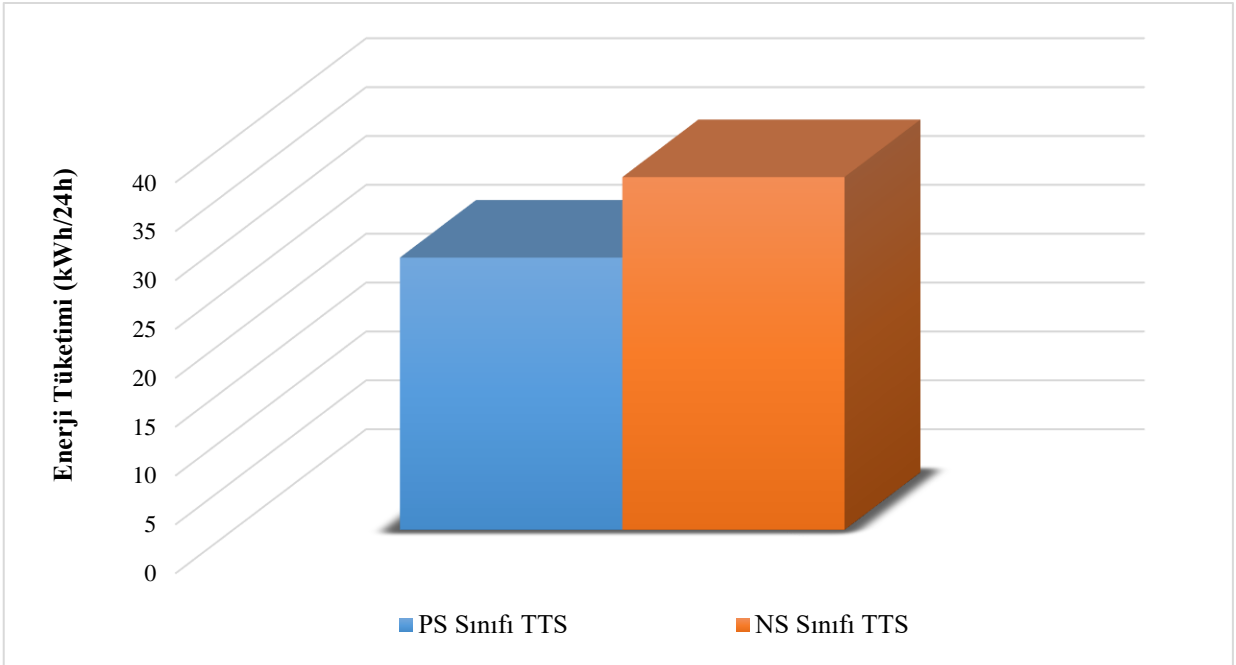
Şekil 7. PS sınıfı TTS’ nin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri (Evaporator inlet-outlet temperature values of PT class RDC)

NS sınıfına ait TTS'lerin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Grafikte NS sınıfına ait TTS'nin evaporasyon değeri maksimum -32,5 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 8. NS sınıfı TTS'nin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri (Evaporator inlet-outlet temperature values of NT class RDC)

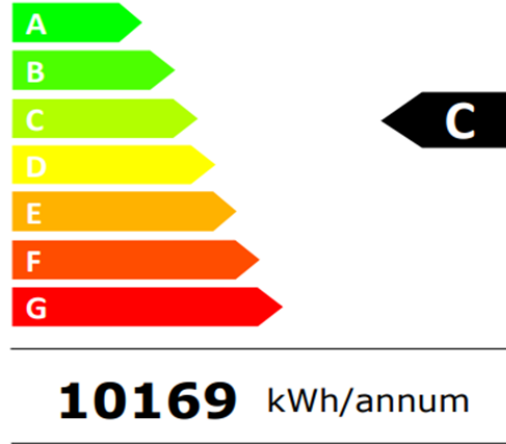
PS ve NS sınıfına sahip TTS'lerin günlük enerji tüketim grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Günlük enerji tüketimi Eşitlik 6 yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 9. PS ve NS sınıfı TTS'lerin günlük enerji tüketimi değerleri (Daily energy consumption values of PT and NT class RDCs)

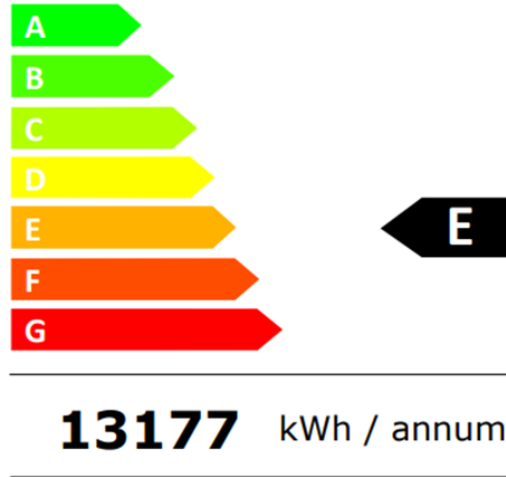
PS sınıfına sahip TTS' nin enerji etiket sınıfı "C" olarak belirlenmiş etiket sınıfı belirlenirken Eşitlik

7,8,9 yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 10’da enerji etiketine dair görsel verilmiştir.



Şekil 10. PS sınıfı TTS’ nin enerji etiketine ait görsel (Image of the energy label of PT class RDC)

NS sınıfı TTS’ nin enerji etiket sınıfı “E” olarak belirlenmiş ve etiket sınıfı belirlenirken Eşitlik 7,8,9 yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 11’de enerji etiketine dair görsel verilmiştir.



Şekil 11. NS sınıfı TTS’ nin enerji etiketine ait görsel (Image of the energy label of NT class RDC)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına göre test edilen iç üniteler, PS ve NS sınıflarına sahip olup, tek bir merkezi dış ünite tarafından kontrol edilerek enerji verimliliği sağlanmıştır.
- PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için günlük toplam enerji

tüketimleri sırasıyla 27,86 kWh/gün ve 36,1 kWh/gün olarak hesaplanmıştır.

- CO<sub>2</sub> eko-tasarım dış ünite ile entegrasyonu sağlanan TTS’ler yaşam döngüsü boyunca daha enerji verimli ve sürdürülebilir sistemler olmaktadır.
- PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için enerji sınıfları ise sırasıyla C ve E sınıfı olduğu görülmüştür.

- TTS'lerdeki maksimum ve minimum paket sıcaklıkları (-0,8 / +5 °C ve -16 / -27 °C) belirlenmiştir. Analizler sonucunda çeşitli sıcaklık gereksinimleri karşılanmış ve kabin içindeki ürünler belirtilen standart sıcaklık sınıflarına uygun olarak soğuk/donmuş muhafazası sağlanmıştır.
- PS sınıfı TTS için TTA değeri “6,61 m<sup>2</sup>”, NS sınıfı TTS için TTA değeri “6,2 m<sup>2</sup>” olarak hesaplanmıştır.
- PS sınıfı TTS için SYET değeri “29068 kWh/yıl”, NS sınıfı TTS için SYET değeri “24769 kWh/yıl” olarak hesaplanmıştır.
- PS sınıfı TTS için EVE değeri “34,98” bulunarak enerji etiket sınıfı “C” olarak belirlenmiştir. NS sınıfı TTS için EVE değeri “53,2” bulunarak enerji etiket sınıfı “E” olarak belirlenmiştir.
- CO<sub>2</sub> kullanımı enerji maliyetlerini azaltırken sistem performansını artırır. Gıda endüstrisi, süpermarket soğuk depo sistemleri, endüstriyel prosesler ve iklimlendirme gibi çeşitli alanlarda tercih edilir.
- Multi-ejektörlü transkritik CO<sub>2</sub> soğutma sistemleri çevre dostu ve enerji verimliliği sağlar. Doğru entegrasyon ve çalışma prensiplerinin anlaşılmasıyla endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilir soğutma çözümleri geliştirilebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çalışmaya vermiş oldukları desteklerinden dolayı Nurdil Teknik Soğutma A.Ş' ye teşekkür ederler.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Süleyman ERTEN:** Deney düzeneğini hazırlayarak deneyleri yapmıştır.

He prepared the experimental setup and performed the experiments.

**Melis ÖDER:** Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

**Burak Can TEMÜR:** Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

**Buğra KOÇ:** Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kasap, F., Acül, H., Canbaz, H., & Erbil, S. (2011). R744 (CO<sub>2</sub>) soğutucu akışkanlı soğutma sistemleri, kanatlı borulu R744 (CO<sub>2</sub>) evaporatör ve gaz soğutucu tasarım esasları. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 1, 369-389.
- [2] Dai, B., Cao, Y., Zhou, X., Liu, S., Fu, R., Li, C., & Wang, D. (2024). Exergy, carbon footprint and cost lifecycle evaluation of cascade mechanical subcooling CO<sub>2</sub> commercial refrigeration system in China. Journal of Cleaner Production, 434, 140186.
- [3] Sengupta, A., & Dasgupta, M. S. (2023). Energy and advanced exergoeconomic analysis of a novel ejector-based CO<sub>2</sub> refrigeration system and its optimization for supermarket application in warm climates. Thermal Science and Engineering Progress, 44, 102056.
- [4] Chi, W., Yang, Q., Chen, X., Li, L., Liu, G., & Zhao, Y. (2023). Advanced exergy analysis of NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> cascade refrigeration system with ejector. International Journal of Refrigeration, 145, 185-195.
- [5] Li, L., Tian, H., Liu, K., Wu, Y., Wang, X., Liang, X., & Shu, G. (2024). Optimum pressure control with three controllable ejectors of a CO<sub>2</sub>



- multi-ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 157, 172-185.
- [6] Yang, D., Zhu, J., Wang, N., & Xie, J. (2023). Experimental study on the performance of trans-critical CO<sub>2</sub> two-stage compression refrigeration system with and without an ejector at low temperatures. *International Journal of Refrigeration*, 154, 231-242.
- [7] Leerbeck, K., Bacher, P., Heerup, C., & Madsen, H. (2023). Grey box modeling of supermarket refrigeration cabinets. *Energy and AI*, 11, 100211.
- [8] Yılmaz, D., Mancuhan, E., & Yılmaz, B. (2020). Experimental investigation of PCM location in a commercial display cabinet cooled by a transcritical CO<sub>2</sub> system. *International Journal of Refrigeration*, 120, 396-405.
- [9] Sánchez, D., Vidan-Falomir, F., Nebot-Andrés, L., Llopis, R., & Cabello, R. (2023). Alternative blends of CO<sub>2</sub> for transcritical refrigeration systems. Experimental approach and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 279, 116690.
- [10] Singh, S., Maiya, P. M., Hafner, A., Banasiak, K., & Neksa, P. (2020). Energy efficient multiejector CO<sub>2</sub> cooling system for high ambient temperature. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100590.
- [11] Yu, B., Wang, D., Liu, C., Jiang, F., Shi, J., & Chen, J. (2018). Performance improvements evaluation of an automobile air conditioning system using CO<sub>2</sub>-propane mixture as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 88, 172-181.
- [12] Aktaş, M., Koşan, M., Arslan, E. ve Tuncer, AD (2019). Termal enerji depolama ünitesinin modifikasyonu ile yeni bir güneş destekli ısı pompası sisteminin tasarlanması. *Makine Mühendisleri Enstitüsü Bildirileri, Bölüm A: Güç ve Enerji Dergisi*, 233 (5), 603.
- [13] TS EN ISO 23953-2:2017 Refrigerated display cabinets-Part 2: Classification, requirements and test conditions.
- [14] Commission Delegated Regulation (EU) 2019/2018 of 11 March 2019 supplementing Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of refrigerating appliances with a direct sales function (Text with EEA relevance). (2019, 11 March). Office Journal of the European Union (L 315). [http://data.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/2018/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/2018/oj)
- [15] İyim E., Altıntaş A., Almiş Ç. Karbondioksit Akışkanlı Transkritik Soğutma Sistemlerinde Valf Seçim Kriterleri.