



## TİCARİ BİR SOĞUTUCUDA ÜRÜN SICAKLIK SINIFLARININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

F. Mertkan ARSLAN<sup>1\*</sup>, Hüseyin GÜNERHAN<sup>2</sup>, Hakan TAVUKCU<sup>3</sup>, Binnur SOYSAL<sup>4</sup>,  
Sertan AKSOY<sup>5</sup>, Bora DEVRİM<sup>6</sup>,

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Bornova-İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8359-7743>

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Bornova-İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2418>

<sup>3</sup>Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0006-6318-2683>

<sup>4</sup>Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-1165-0785>

<sup>5</sup>Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0006-5524-9657>

<sup>6</sup>Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-8749-1012>

### Anahtar kelimeler

### Öz

*Ticari soğutucular, enerji verimliliği, enerji tüketimi, kutu ve şişe sıcaklıkları, ürün sıcaklık sınıfları*

*Bu çalışmada, 680 litre hacim kapasiteli dikey, kapalı ve ısı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusunun gece-gündüz modlarında ve farklı ürün sıcaklık sınıflarındaki enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Ticari kutu soğutucusu R290 (propan) soğutma akışkanı ile çalışmakta ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimi içerisinde adyabatik olmayan kılcal boru (emiş hattı ısı değiştiricisi) sistemi kullanılmaktadır. Deneysel düzenek, TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak kalibre edilmiş ve kurulmuştur. Deneyler; 25°C ± 0.8°C sıcaklık ve %60 ± %2 bağıl nem sağlayan bir iklimlendirme odasında 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Ticari soğutucu tam yük altında (700 adet 330 ml kutu), gece - gündüz modlarında ve iki farklı sıcaklık sınıfında (K1 ve K4) test edilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları, alüminyum içecek kutularının test sürecindeki sıcaklıklarını ifade eden bir test standartıdır. K1 sıcaklık sınıfında test edilen kutu sıcaklıkları; 0°C-7°C ve K4 sıcaklık sınıfında test edilen kutular ise; 1°C-9°C sıcaklıkları arasında kalması sağlanmıştır. K1 sıcaklık sınıfına ait deneylerde gündüz ve gece sırasıyla, 24 saatte 3.255 kWh ve 1.379 kWh enerji harcanmıştır. K4 sıcaklık sınıfına ait deneylerde ise bu değerler gündüz modunda 3.089 kWh ve gece gece modunda 1.341 kWh olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, K1 sıcaklık sınıfındaki enerji tüketimi K4 sıcaklık sınıfına göre gündüz ve gece modlarında sırasıyla %5.37 ve %2.83 daha yüksek ölçülmüştür.*

\* mertkan.arslan@gmail.com  
doi : 10.46399/muhendismakina.1330336

---

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRODUCT TEMPERATURE CLASSES ON ENERGY CONSUMPTION IN A CLOSED DISPLAY REFRIGERATOR

---

---

### Keywords

Display cabinet refrigerator, energy efficiency, energy consumption, can and bottle temperatures, temperature classes

---

### Abstract

*In this study, the energy consumption of a vertical closed display refrigerator (680 Liters) in day-night modes and in different product temperature classes was experimentally investigated. Closed display refrigerator works with R290 (propane) refrigerant. Moreover, non-adiabatic capillary tube (suction line heat exchanger) system is used in the vapor compression refrigeration cycle. The experimental setup was carried out and calibrated in accordance with the TS EN ISO 22044:2022 standard. Experiments were carried out for 24 hours in a test room providing a temperature of  $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  and a relative humidity of  $60\% \pm 2\%$ . The commercial refrigerator has been tested under full load (700 pcs. 330 ml cans), in day and night modes, and in two different temperature classes (K1 and K4). Can temperatures which tested in the K1 temperature class were kept between  $0^{\circ}\text{C}$ - $7^{\circ}\text{C}$ . These temperature values for the K4 temperature is between  $1^{\circ}\text{C}$ - $9^{\circ}\text{C}$ . In the experiments of the K1 temperature class, 3.255 kWh/24h and 1.379 kWh/24h energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of K4 temperature class, these values were measured as 3.089 kWh/24h in day mode and 1.341 kWh/24h in night mode. As a result, the energy consumption in the K1 temperature class was 5.37% and 2.83% higher in day and night modes, respectively, compared to the K4 temperature class.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.07.2023

Kabul Tarihi : 25.09.2023

Research Article

Submission Date : 20.07.2023

Accepted Date : 25.09.2023

---

## Extended Abstract

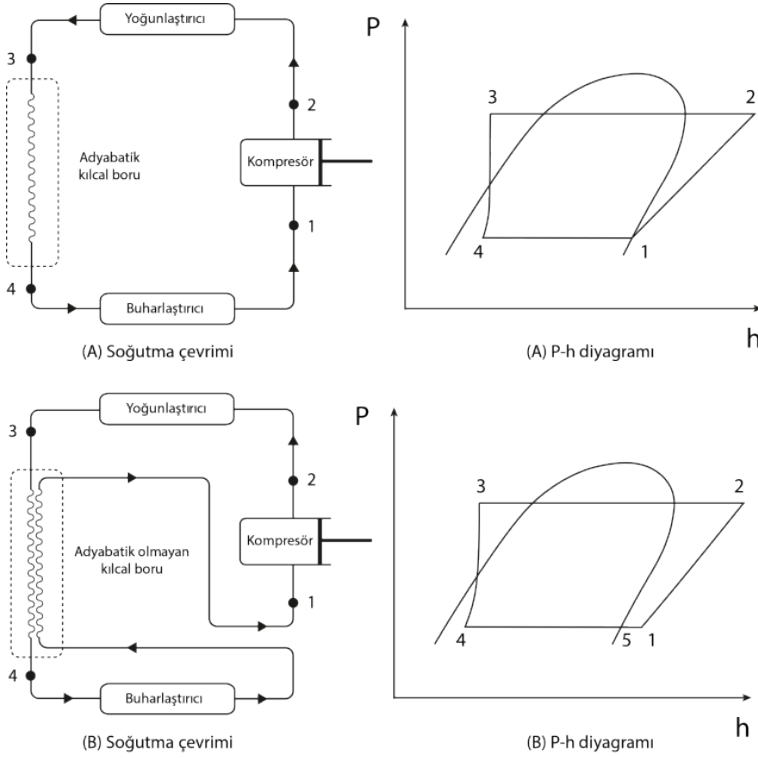
In this study, the energy consumption of a vertical closed display refrigerator (680 Liters) in day-night modes and in different product temperature classes was experimentally investigated. Closed display refrigerator works with R290 (propane) refrigerant. Moreover, non-adiabatic capillary tube (suction line heat exchanger) system is used in the vapor compression refrigeration cycle. The experimental setup was carried out and calibrated in accordance with the TS EN ISO 22044:2022 standard. Experiments were carried out for 24 hours in a test room providing a temperature of  $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  and a relative humidity of  $60\% \pm 2\%$ . Cans are filled with 33% propylene glycol and 67% water. The commercial refrigerator has been tested under full load (700 pcs. 330 ml cans), in day and night modes, and in two different temperature classes (K1 and K4). K1 and K4 temperature classes are a test standard that expresses the temperatures of aluminum beverage cans during the testing process. Can temperatures which tested in the K1 temperature class were kept between  $0^{\circ}\text{C}$ - $7^{\circ}\text{C}$ . These temperature values for the K4 temperature is between  $1^{\circ}\text{C}$ - $9^{\circ}\text{C}$ . In the experimental setup, thermocouples were placed on the surface of the cans, on the suction-discharge line of the compressor, on the outer upper surface of the compressor, on the dryer surface, and on the air and inlet and outlet parts of the evaporator. Thermocouples on the cans are positioned at the corners of the cans on each shelf. As a result, temperature measurements were made from 26 points in total within the scope of experiments. T-type thermocouples used in the experiments are connected to a panel and the mV change of the thermocouples with the Seebeck effect can be read through a program. The Power Analyzer is connected to power outlet of the closed display refrigerator to measure the total power consumed by the system (compressor, fans, lighting, electronic devices, etc.). The data obtained from the sensors in the test setup were recorded for 24 hours with a time interval of a minute. In the day mode and K1 temperature class tests, it was observed that the temperatures of all cans remained between  $0^{\circ}\text{C}$ - $7^{\circ}\text{C}$ , which are the limit values of the TS EN ISO 22044:2022 standard. The maximum temperature of the measured cans during the test is  $4.7^{\circ}\text{C}$ . In this experiment, it was measured that the average temperature of all 20 cans varied between  $3.4^{\circ}\text{C}$  and  $2.8^{\circ}\text{C}$ . As a result, it has been shown that average can temperatures in the K1 temperature class and day mode experiments are kept below the average temperature limit of  $3.5^{\circ}\text{C}$ . In the experiments of the K4 temperature class and the day mode, it was observed that all can temperatures were between the limit values ( $1^{\circ}\text{C}$ - $9^{\circ}\text{C}$ ), similar to the experiments belonging to the K1 temperature class. The maximum temperature of the measured cans throughout the experiment was measured as  $6^{\circ}\text{C}$ . The average temperature of cans was  $4.6^{\circ}\text{C}$ . In the experiments of K4 temperature class and day mode, it was observed that the average can temperatures were kept below the average temperature limit of  $5^{\circ}\text{C}$ . In the experiments of temperature class K1 and night mode, the minimum, average and maximum can temperatures measured throughout the experiment are  $3.2^{\circ}\text{C}$ ,  $5.2^{\circ}\text{C}$  and  $7.4^{\circ}\text{C}$ , respectively. In the experiments of K4 temperature class and night mode, the measured minimum, average and maximum can temperatures are  $4.7^{\circ}\text{C}$ ,  $6.8^{\circ}\text{C}$  and  $9^{\circ}\text{C}$ , respectively. In K1 day mode has the highest compressor operating percentage at 23.54%. In K4-night mode, which has the lowest compressor operating percentage, this value was 13.68%. K1-day mode has the highest compressor operating percentage, which was 23.54%. In K4-night mode, which has the lowest compressor operating percentage, this value was 13.68%. In 24 hours experiments in K1 temperature class, 3,255 kWh and 1,379 kWh energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of the K1 temperature class, 3,255 kWh and 1,379 kWh energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of K4 temperature class, these values were measured as 3,089 kWh in day mode and 1,341 kWh in night mode. As a result, the energy consumption in the K1 temperature class was 5.37% and 2.83% higher in day and night modes, respectively, compared to the K4 temperature class.

## 1. Giriş

Ticari soğutucular dolabın yerleştirilme şekline göre basitçe; yatay, dikey, yarı dikey, kombine ve açık veya kapalı olmasına göre sınıflandırılabilir (TS EN ISO 22044). Çalışma kapsamında, dikey ve kapalı cam dolaplı bir ticari kutu soğutucu kullanılmıştır.

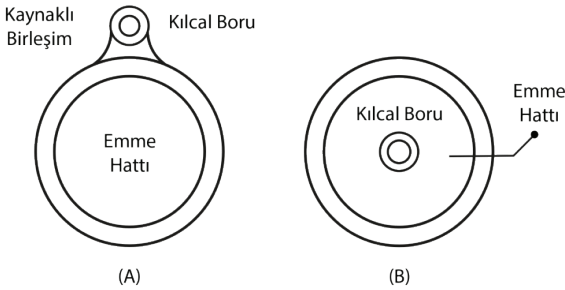
Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi, soğutma etkinlik katsayısının (COP) ve soğutma kapasitesinin yüksek olması gibi olumlu özelliklerinden dolayı, ticari soğutucularda yaygın olarak kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi temel olarak kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve kısılma vanasından oluşmaktadır (bkz. Şekil 1). Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimini kısaca özetlemek gerekirse; öncelikle, düşük basınçlı, düşük sıcaklıklı ve buhar fazındaki bir soğutucu akışkan kompresöre girer ve kompresöre iş girişi ile bu soğutucu akışkan sıkıştırılır. Kompresörden çıkan yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki soğutucu akışkan yoğuşturucuya girer ve sabit basınç (borulardaki basınç kaybı hariç) altında ortama ısı verir ve yoğunlaşma gerçekleşir. Daha sonra kısılma vanasına gelen soğutucu akışkan, yüksek basınçtan düşük basınca genişler ve sıcaklığı düşer. Sonraki aşamada, soğutucu akışkan buharlaştırıcı yardımıyla soğutulmak istenen ortamdan ısı çeker. Bu döngü kompresör çalıştıkça devam etmektedir (Kulkarni, Chavali ve Dikshit, 2023; Çengel ve Boles, 2015).

Soğutma çevrimlerinde genel olarak kılcal borular, geometrilerine bağlı olarak düz veya sarmal olarak ve sistemin emiş hattına ısı transferi olup olmamasına göre adyabatik veya adyabatik olmayan kılcal boru sistemleri olarak sınıflandırılabilirler. Şekil 1A ve Şekil 1B ile adyabatik ve adyabatik olmayan kılcal boru içeren buhar sıkıştırımlı sistemlerin, genel şeması ve P-h (basınç-entalpi) diyagramı gösterilmiştir. Adyabatik bir kılcal borulu sistemlerde, çevre ile ısı alışverişi ihmal edilebilir ölçüdedir. Adyabatik olmayan kılcal borulu sistemlerde ise, kılcal boru emiş hattına lehimlenmiştir. Böylelikle, kılcal boru ile emiş hattında ısı değişimi gerçekleşebilmektedir (Şekil 1B). Soğutucu akışkan adyabatik kılcal boruda genellikle izentalpik bir süreç gerçekleşirken, adyabatik olmayan kılcal boruda entalpi değeri azalmaktadır. Soğutma sistemlerinde, adyabatik olmayan kılcal boru kullanıldığında, kılcal borudan emiş hattına bir ısı geçişi gerçekleştiği için, buharlaştırıcı girişindeki kuruluk derecesi ve özgül entalpi düşmektedir. Bu da soğutma kapasitesinde yani buharlaştırıcının ortamdan elde ettiği ısı miktarında artışa yol açmaktadır. Buna ek olarak, bu sistemin bir avantajı ise, soğutucu akışkanın kompresöre kızgın buhar olarak girmesini sağlamakta ve kompresörün buhar fazında çalışmasını garanti etmektedir. Böylelikle, kompresörün zarar görmesi ve sistemin emme hattındaki havadaki nemden kaynaklı oluşan yoğuşma engellenir. Ancak, emme hattındaki bu sıcaklık artışı kompresörün harcadığı enerjiyi arttırmaktadır.



Şekil 1. Soğutma Çevrimi. A) Adyabatik B) Adyabatik Olmayan Kılcal Boru Sistemi (Rasti, Ban ve Jeong, 2017; Xu ve Bansal, 2002)

Yanal ve eş merkezli olmak üzere iki tip adyabatik olmayan kılcal boru sistemi olmasına rağmen, üretimi kolaylığı ve yüksek ısı değişim verimliliği nedeniyle yanal tip kılcal boru daha sık kullanılmaktadır (bkz. Şekil 2) (Rasti ve diğ., 2017; Sarker ve Jeong, 2012). Bu çalışmada deneyleri gerçekleştirilen soğutma sisteminde, yanal adyabatik olmayan kılcal boru sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Adyabatik Olmayan Kılcal Boru Tipi A) Yanal B) Merkezi (Sarker ve Jeong, 2012)

Soğutma sistemlerinde, HCFCs, HFCs (R134a, R404A, R410A, R32, vb.), HFOs (R1234yf, R1234ze, ve karışımları), HCs (R290, R600a, vb.), Doğal soğutucular (R717, R744, vb.), ve birçok akışkan tipi, soğutucu akışkan olarak kullanılabilir (Gao, Cui, Jing, Zhang ve Zhang, 2021). CFC ve HCFC soğutucu akışkanlar, yüksek ozon inceltme potansiyeline (ODP) ve/veya küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahiptir. R134a, R125, R32 ve R410A gibi HFC soğutucu akışkanlarının ODP değeri sıfır olmasına rağmen GWP değerleri çok yüksektir. Bununla birlikte, ultraviyole ışınımın etkisi altında, Cl serbest radikalleri içeren bu tür soğutucu akışkanların ozon tabakasına zarar verdiği ve küresel ısınmaya sebep olduğu doğrulanmıştır (Zheng ve diğ., 2022). Ozon tabakasına zarar veren ve küresel ısınmaya yol açan bu tip soğutucu akışkanların kullanımı, Kyoto protokolü, Montreal protokolü, F-Gaz Avrupa Konseyi düzenlemeleri gibi protokoller ve düzenlemeler ile kısıtlanmıştır (Roy ve Halder, 2020).

Bir doğal hidrokarbon olan R290 (Propan) diğer soğutma akışkanlarına göre daha düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik gibi iyi termofiziksel özelliklere sahiptir (Zhao, Yuan, Gao, Wang ve Yan, 2019). Bunun yanında, düşük üretim sıcaklığı, metallerde korozyon oluşturmaması, sıfır ODP ve ihmal edilebilir GWP değerine sahip olması neticesinde, R290 diğer soğutucu akışkanlara kıyasla rekabetçi bir alternatif olduğu gösterilmiştir. Çabuk tutuşma özelliği R290 akışkanın bir dezavantajı olmasına rağmen, çevre dostu olması ve yüksek soğutma performansına sahip olması neticesinde bu dezavantajını dengelemektedir (Gao, He, Cai ve Fan, 2020; Yadav, Liu ve Kim, 2022). Bilimsel literatürde R134a akışkanının düşük GWP alternatifi olarak birçok akışkan test edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, R290, R600a ve bu hidrokarbon akışkanların karışımlarının birçok açıdan R134a akışkanına uygun alternatifler oldukları gösterilmiştir (Jwo, Ting ve Wang, 2009; Kulkarni, Chavali ve Dikshit, 2023; Sánchez ve diğ., 2017, Sánchez ve diğ., 2022; Wongwises ve Chimres, 2005).

Bu çalışmalara örnek olarak; Sanchez ve diğ. (2022), R134a, R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a ve R744 soğutma akışkanları kullanarak bir ticari kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, enerji harcama bakımından en verimli akışkanın R290 olduğunu ve R290 akışkanının R134a akışkanına oranla %27.5 daha az enerji tükettiğini gözlemlemişlerdir. Elbel, Visek ve Hrnjak (2016), R134a akışkanına alternatif olarak doğal soğutucu akışkanlar olan R744 (CO<sub>2</sub>) ve R290 kullanarak, ticari bir kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, R744 akışkanı R134a akışkanına göre %27 daha fazla enerji harcarken, R290 akışkanı R134a akışkanına göre %9 daha az enerji harcamıştır. Bu çalışmanın bir diğer sonuçlarından bir diğer ise R744 akışkanı R290 akışkanı gibi yanıcı olmamasına rağmen R744 sistem maliyeti yüksektir ve yüksek hava sıcaklıklarında enerji verimliliği düşmektedir. Ancak, R744 akışkanın yüksek hava sıcaklıklarında bile tatmin edici sonuçlar elde ettiklerini yayınlamışlardır.

Literatürde araştırmacılar ticari soğutucuların enerji tüketimlerini incelemek ve azaltmak için birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Chaomuang, Flick ve Laguerre (2017) yayınladıkları derleme çalışmasında, açık ve kapalı ticari soğutucularının performansını, hem sıcaklık dağılımı hem de enerji tüketimi bakımından, deneysel ve sayısal yaklaşımlarla iyileştirme girişimlerini incelemişlerdir. Ticari soğutucuların enerji tüketiminin azaltılmasındaki en önemli girişimlerden biri, ticari soğutucuyu kapalı (ön kapılı) olarak tasarlamaktır. Bu çözüm ile daha iyi sıcaklık homojenliğinin yanı sıra %70'e varan enerji tasarrufu sağlanabileceği kanıtlanmıştır. Fricke ve Becker (2010), birbiri ile aynı özellikteki iki farklı süpermarkette açık ve kapalı ticari soğutucuların enerji harcaması bakımından karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, açık olarak tasarlanan ticari soğutucunun 1.3 kat daha fazla enerji harcadığı tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç da, 2015 yılında Yeni Zelanda'da yayınlanan raporda elde edilmiştir. Ticari soğutuculara kapı eklenmesi halinde, %42 enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir (Robertson, 2015).

Chaomuang, Flick, Denis ve Laguerre (2019), yayınladıkları makalede, kapalı ticari soğutucularının çalışma koşullarını, kapı açma sıklığını, ortam sıcaklığı etkilerini ve kullanılan hacimlerin yüzdesi gibi enerji ve ısıl performansı önemli ölçüde etkileyen değişkenleri deneysel olarak incelemişlerdir. Kapı açma sıklığı saatte sırasıyla 10 ve 60 olarak ayarlandığında kompresörün çalışma yüzdesinin %25'den %44'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Dahası, ürün sıcaklığının dış ortam sıcaklığından ve kapı açıp kapama sıklığından doğrudan etkilendiği ve özellikle ön bölgedeki ürünlerin yüksek sıcaklığa en fazla maruz kalan bölge olduğu bu çalışmada vurgulanmıştır.

Ocak, Koşan, Erten, Erdoğmuş ve Öder (2023) yayınladıkları makalede, kapalı ticari soğutucularında kullanılan kompresör teknolojilerinin enerji verimliliğine önemli ölçüde katkı sağladığını göstermişlerdir. Çalışmada, sabit hızlı kompresör ve değişken hızlı kompresör karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak değişken hızlı kompresör %25.9 daha az enerji harcadığı gösterilmiştir.

Ticari soğutucularda enerji verimliliği bakımından gelecek vaat eden bir başka yöntem ise faz değiştirici malzemelerin kullanılmasıdır. Selvnes, Allouche, Manescu ve Hafner (2021), hazırladıkları derleme çalışmasında, soğutma sistemlerine uygulanan faz değiştiren malzemeler hakkındaki son gelişmeleri kapsamlı olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzemelerin kullanılması sonucunda, birçok ticari soğutucuda toplam enerji harcaması düşmüştür ve maksimum kabin sıcaklığında ise iyileşmeler sağlanmıştır. Beek ve Hans (2014), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, ticari kutu soğutucusunun arka kanalına uyguladıkları faz değiştirici malzeme sayesinde, soğutucudaki enerji harcamasında %4-10 arasında bir düşme sağlamışlardır (Beek ve Hans, 2014). Mađerić, Pavković ve Lenić



(2019), gizli ısı depolu (buzlu su) kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, termostatı bir buz bankası rölesiyle değiştirilmesi neticesinde, enerji tüketiminde %15'e varan bir azalma elde etmişlerdir.

Bilimsel literatürde, kapalı ticari kutu soğutucularındaki ortalama kutu sıcaklıklarının enerji harcamasına etkisinin yeterince araştırılmadığı tespit edilmiştir. Bu açıdan, çalışma kapsamındaki deneylerde, ticari kutu soğutucusu, K1 ve K4 kutu sıcaklık sınıflarında ve gece - gündüz modlarında enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, R290 (90 gr) soğutucu akışkanına sahip, yanal tip adyabatik olmayan kılcal boru sistemli, aç/kapa kontrolü ile çalışan pistonlu kompresör içeren, dikey ve kapalı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusu kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı gece-gündüz modlarının ve kutu sıcaklıklarının enerji verimliliğine etkisini araştırmaktır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde, soğutucudaki kutu sıcaklıklarının ortalama  $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$  değiştirilmesinin enerji tüketiminde %2.83-%5.37 azalmaya yol açtığı gösterilmiştir. Bu noktada, ticari soğutucularının içerisindeki kutuların sıcaklıklarının en uygun sıcaklıkta ayarlanmasının enerji tüketimi açısından gerekliliği bu çalışmanın önemli sonuçlarından biridir.

## 2. Metodoloji

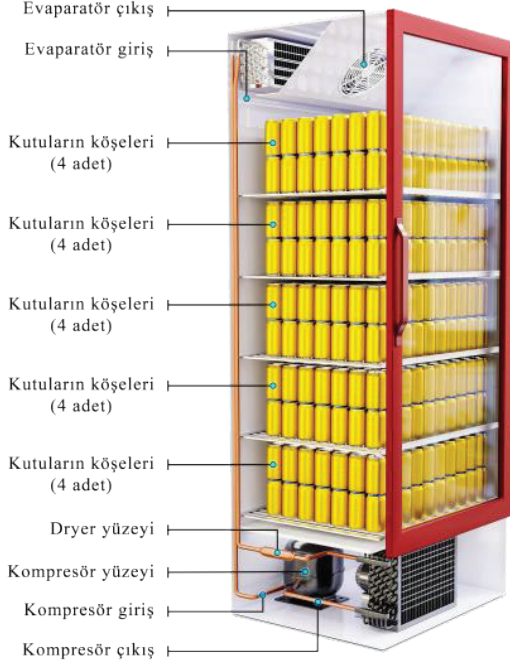
Bu çalışmada, üzerinde testleri gerçekleştirilen ticari kutu soğutucusu Şekil 3 ile gösterilmiştir. Ticari kutu soğutucusun testleri toplam 700 adet kutu ile tam dolu olarak gerçekleştirilmiştir. Kutuların içerisi %33 oranında propilen glikol ve %67 oranında su ile doldurulmuştur. Deneyler,  $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $\pm 2\%$  bağıl nem sağlayan PID (Oransal İntegral, Türevsel) deneyleyici algoritması ile kontrol edilen bir iklimlendirme odasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Testi Gerçekleştirilen Ticari Kutu Soğutucusu

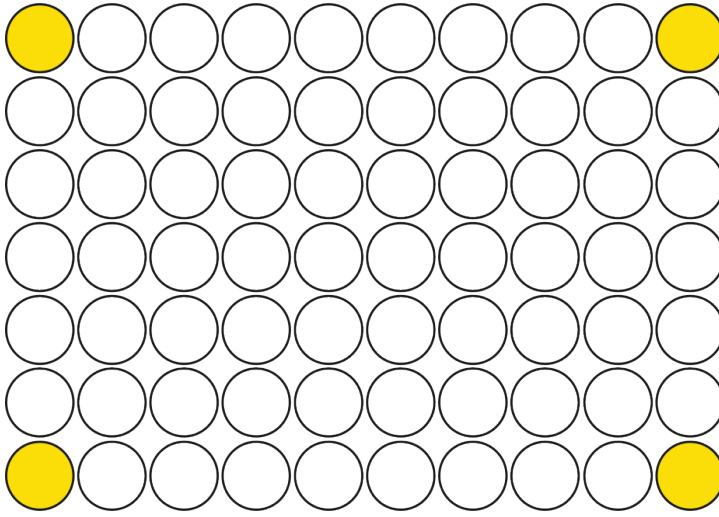


İklimlendirme odası ve deney düzeneği TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak kalibre edilmiş ve kurulmuştur. Ticari kutu soğutucunun üzerine kurulan deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 4 ile gösterilmiştir. Şekil 4’de anlatım ve açıklama kolaylığı açısından ticari soğutucu sistemi basitleştirilerek gösterilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık Ölçüm Noktaları

Deney düzeneğinde termokupllar, kutuların yüzeyine, kompresörün emme - basma hattı üzerine, kompresörün dış üst yüzeyine, dryer yüzeyine ve evaporatörün hava ve giriş çıkış kısımlarına yerleştirilmiştir. Kutuların üzerindeki termokupllar, her bir raftaki kutu paketlerinin köşelerinde olacak şekilde konumlanmıştır (bkz. Şekil 5). Böylelikle, kutular üzerinden toplam 20 noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, deney kapsamında toplam 26 noktadan sıcaklık ölçümü sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan t tipi termokupllar bir panele bağlanmakta ve termokuplların Bakır ve Nikel telleri ucunda seebeck etkisiyle gerçekleşen mV değişimi bir program sayesinde okunabilmektedir.



Şekil 5. Bir Raf Üzerindeki Ölçülen Kutuların Konumları. Sarı Renkteki Kutulardan Ölçüm Alınmıştır (TS EN ISO 22044:2021)

Güç Analizörü, sistemin (kompresör, fanlar, ısıtkılandırıcılar, elektronik cihazlar, vb.) toplam harcadığı gücü ölçmek için soğutucunun güç çıkışına bağlanmıştır. Test düzeneğindeki sensörlerden elde edilen veriler 1 dakikalık zaman aralığı ile 24 saat boyunca kaydedilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan sensörlerin verileri Tablo 1 ile gösterilmiştir.

Tablo 1. Sensörlerin Özellikleri

Tipi	Marka	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Güç Analizörü	Yokogawa	V= 0-2kV A=0-20A	0.1% (V) 0.1% (mA)
T tipi Termokupl	Agilent Technologies	Sıcaklık -200/350°C	±1°C
Nem Sensörü	HT-6830	10-95%RH	±1%RH

Ticari kutu soğutucusu enerji tasarrufu sağlamak amacıyla gece ve gündüz modlarına sahiptir. Gece modunda, led ışıklar kapatılmakta, kutu sıcaklıklarının daha yüksek sıcaklıklarda olmasına izin verilmekte ve soğutma sistemindeki bileşenlerin çalışma yüzdeleri değişmektedir (kompresör, fanlar, vb). Burada izin verilen sıcaklık değerleri soğutucu dolabın gece modundan gündüz modundaki sıcaklık aralıklarına maksimum 4 saatte tekrardan ulaşabilecek şekilde belirlenir. Çalış-

ma kapsamında, ticari kutu soğutucusu gece ve gündüz modlarında ve iki farklı sıcaklık sınıfında (K1 ve K4) test edilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları, TS EN ISO 22044:2022 standartına bağlı olarak, alüminyum içecek kutuları için uygulanan bir test standartıdır. Test edilen içecek kutuları, test sürecinde bu standartlar ile belirlenen sıcaklık aralıklarında sabit tutulmaktadır. Tablo 2 ile K1 ve K4 sıcaklık sınıflarının sıcaklık aralıklarını göstermektedir. Gece ve gündüz modları ve kutu sıcaklık sınıfları, bir soğutucu elektronik termostat yardımıyla kontrol edilmektedir. Bu açıdan, her bir deney gerçekleştirilmeden önce soğutucu elektronik kontrolcü üzerinde gerekli ayarlamalar uygulanmıştır. Deney başlangıcında elektronik kontrolcünün ayarlamaları tamamlandıktan sonra, soğutucu sistem çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale ulaşana kadar beklenmiş ve sensörlerden elde edilen verilerin kaydedilmesi bu aşamadan sonra gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. K1 ve K4 Sıcaklık Sınıfları

Sınıf	Sıcaklık üst seviyesi (°C)	Sıcaklık alt seviyesi (°C)	Ortalama sıcaklık (°C)
K1	+7	0	+3,5
K4	+9	+1	+5

K1 sıcaklık sınıfında ölçülen kutu sıcaklıkları, ortam sıcaklığından 0°C ve 7°C arasına indirilmelidir. Ortalama kutu sıcaklığı ise 3.5°C veya daha düşük sıcaklıklarda olmalıdır. Bu değerler K4 sıcaklık sınıfında ise, maksimum 9°C, minimum 1°C ve ortalama 5°C olması gerekmektedir. Ölçülen kutuların anlık ortalama sıcaklığı Denklem (1) ile verilen eşitlik ile hesaplanabilir (TS EN ISO 22044:2021)

$$T_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_{kutu,k})_t \quad (1)$$

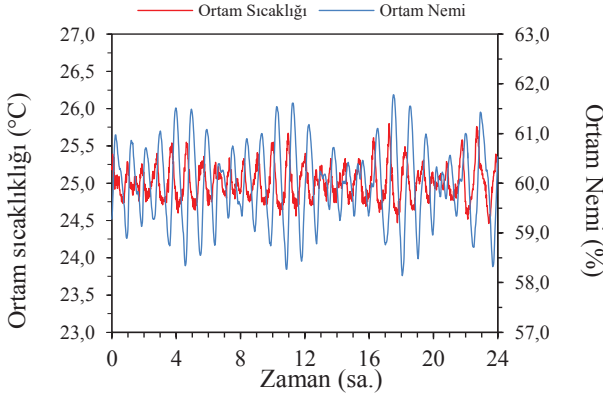
Denklem (1) ile verilen  $T_{ort}$ , ölçülen kutularının anlık ortalama sıcaklığı,  $N$ , ölçülen kutu miktarı,  $k$ , her bir kutunun indeksi,  $t$ , anlık ölçülen numunelerin zaman indeksi,  $T_{kutu,k}$  anlık ölçülen kutu sıcaklığıdır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 3. Sonuç

Dikey ve kapalı cam kapılı dolaplı bir ticari kutu soğutucusunun K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gece-gündüz modunda enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Testler TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak 25°C ± 0.8°C sıcaklık ve %60 ± %2 bağıl nem altında 1 dakikalık kayıt aralıkları ile 24 saat

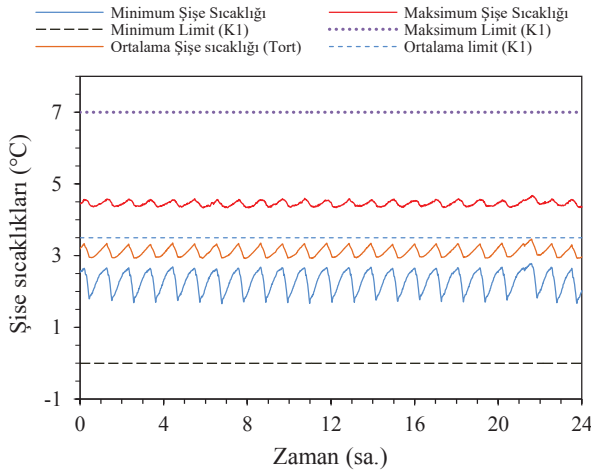
boyunca gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 ile K1 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerin zamana göre ortam sıcaklığı ve nem değerleri görülmektedir.



Şekil 6. K1 Sıcaklık Sınıfına Ve Gündüz Moduna Ait Deneylerin Gerçekleştiği Nem Ve Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gece – gündüz modlarında iklimlendirme odasının nem ve sıcaklık değişimleri birbirine benzer olduğu için sadece K1 sıcaklık sınıfı ve gündüz moduna ait veriler gösterilmiştir (bkz. Şekil 6).

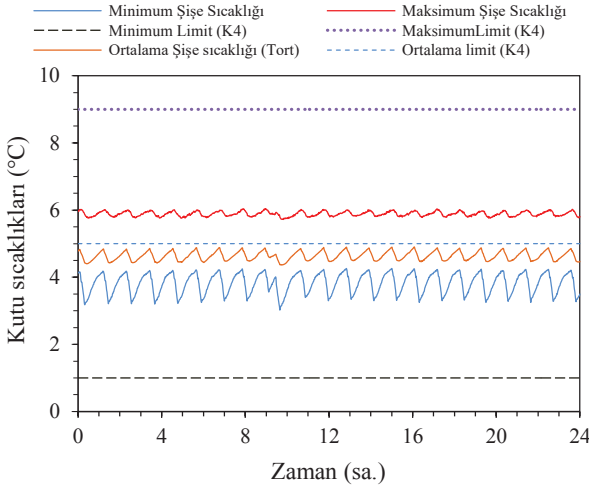
Gündüz modunda K1 ve K4 sıcaklık sınıflarına ait deneylerde ölçülen kutu sıcaklıklarının zaman ile değişimi sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8 ile verilmiştir.



Şekil 7. K1 Sıcaklık Sınıfına ve Gündüz Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

Şekil 7 ile verildiği gibi, kutuların tamamının sıcaklıkları limit değerler olan 0°C-7°C arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Ölçülen kutuların test boyunca maksimum sıcaklığı ise 4.7°C'dir. Bu deneyde, 20 adet kutunun tamamının ortalama sıcaklığı 3.4°C-2.8°C arasında değiştiği ölçülmüştür. Sonuç olarak, K1 sıcaklık sınıfında ve gündüz modu deneylerinde anlık ölçülen ortalama kutu sıcaklıkları, 3.5°C ortalama sıcaklık limitinin altında tutulduğu gösterilmiştir.

K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz modu ait kutu sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 8 ile gösterilmiştir.



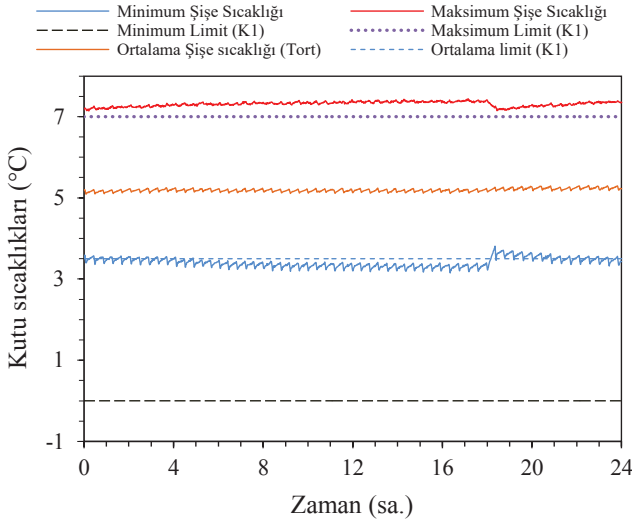
Şekil 8. K4 Sıcaklık Sınıfına ve Gündüz Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerde de K1 sıcaklık sınıfına ait deneylere benzer bir şekilde, tüm kutu sıcaklıklarının limit değerler (1°C-9°C) arasında olduğu gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 3). Ölçümü gerçekleştirilen kutuların deney boyunca maksimum sıcaklığı 6°C olarak ölçülmüştür. Tüm kutuların ortalama sıcaklığı ise 4.6°C olarak ölçülmüştür. K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerde anlık ölçülen ortalama kutu sıcaklıkları, 5°C ortalama sıcaklık limitinin altında tutulduğu gözlemlenmiştir.

TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak gerçekleştirilen K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gündüz moduna ait deneylerin belirtilen standarta göre başarılı olduğu gösterilmiştir.

Gece modunda K1 ve K4 sıcaklık sınıflarına ait deneylerde ölçülen kutu sıcaklıkları sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10 ile verilmiştir. Gece modu deneylerinde, gündüz modundan farklı olarak, enerji tasarrufu sağlanması amacıyla, kutu sıcaklıkları

gündüz moduna göre daha yüksek tutulmaktadır. Gece modunda, termostat ve gömülü algoritmalar yardımıyla sistem komponentlerinin kontrolü sağlanmaktadır. Bu algoritmalar, kompresörün açılma kapanma frekanslarını ayarlamakta, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı fan kontrollerini sağlamaktadır.

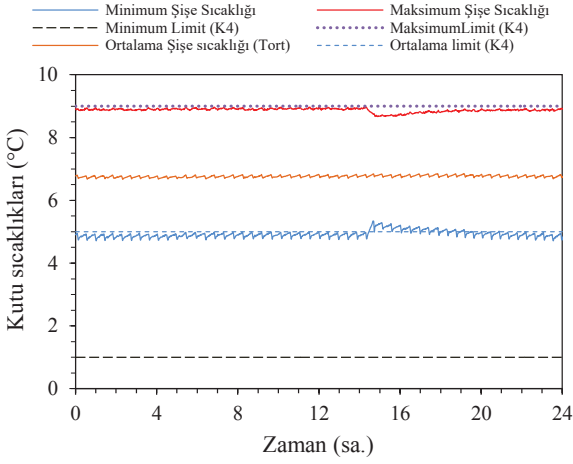


Şekil 9. K1 Sıcaklık Sınıfına ve Gece Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

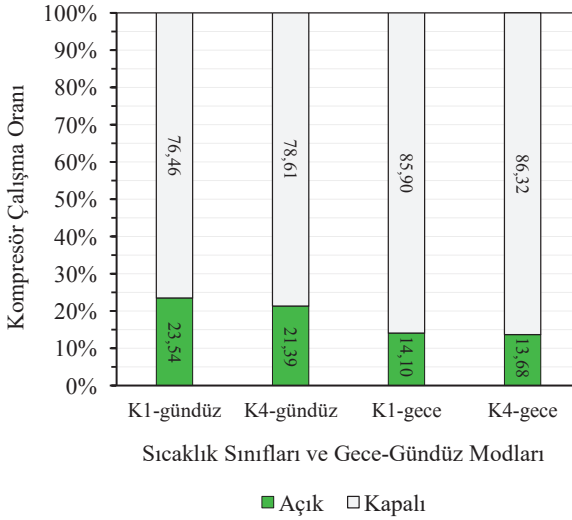
Şekil 9 ile görülebileceği gibi, K1 sıcaklık sınıfına ve gece modu ait deneylerde, deney boyunca ölçülen minimum, ortalama ve maksimum kutu sıcaklıkları sırasıyla, 3.2°C, 5.2°C ve 7.4°C'dir. K4 sıcaklık sınıfına ve gece modu ait deneylerde ise, ölçülen minimum, ortalama ve maksimum kutu sıcaklıkları sırası ile 4.7°C, 6.8°C ve 9°C'dir (bkz. Şekil 10)

Şekil 11 ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, kompresörün çalışma oranları gösterilmiştir. Çalışma oranı, 24 saat boyunca uygulanan deneylerde kompresörün açık kaldığı sürenin 24 saate oranı olarak ifade edilebilir. Deneyler kapsamında, en yüksek enerji harcayan komponent kompresördür. Bu açıdan, kompresörün çalışma oranları, sistemin enerji harcaması hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

K1-gündüz modu en yüksek çalışma yüzdesine sahiptir ve bu değer %23.54'dir. Bir başka deyişle, kompresör 5 saat 39 dakika açık kalmıştır. Bu değeri, %21.39 (5 saat 8 dakika kompresör açık kalma süresi) ile K4-gündüz deneyleri takip etmektedir. K1-gece ve K4-gece deneylerinde ise kompresörün açık kalma süreleri sırasıyla, 3 saat 23 dakika ve 3 saat 17 dakikadır.



Şekil 10. K4 Sıcaklık Sınıfına ve Gece Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

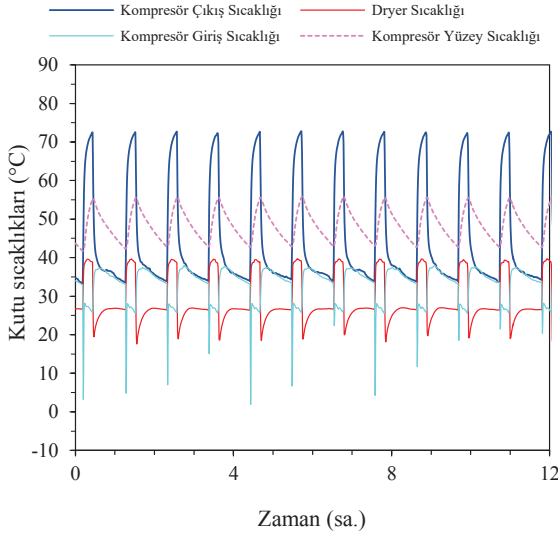


Şekil 11. Kompresörün Çalışma Oranı

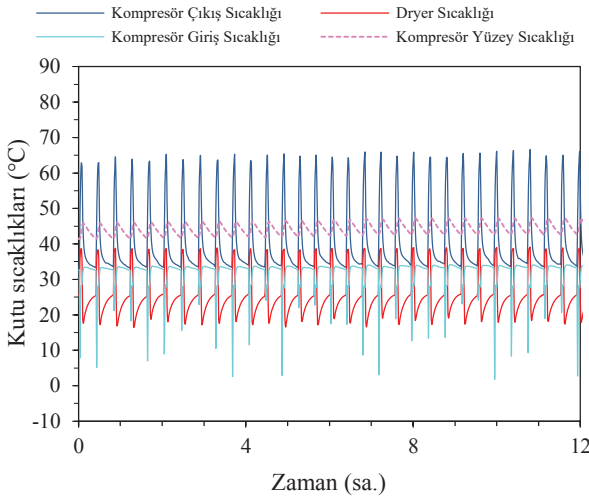
K1-gündüz ve K1-gece modları deneylerinde kompresörün ve dryer sıcaklıklarının zamana göre değişimi sırasıyla, Şekil 12 ve Şekil 13 ile gösterilmiştir. Deneylerde, kompresör giriş, çıkış ve üst yüzeyinden ve yoğunlaştırıcı çıkışında yer alan dryer üzerinden sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 24 saatlik bir periyotta gerçekleşmesine rağmen Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterim kolaylı-



ği açısından 12 saatlik periyotlar halinde gösterilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları için kompresör sıcaklığı döngüleri ve değerleri benzer olduğu için sadece K1 sıcaklık sınıfına ait kompresör sıcaklıkları gösterilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13 değerlendirildiğinde, gündüz ve gece modlarındaki kompresörün çalışma frekansının önemli ölçüde farklı olduğu gözlemlenebilir. K1 sıcaklık sınıfı deneyleri süresince, gündüz modunda kompresör toplam 24 defa açılıp kapandığı ve gece modunda ise bu frekans değerinin 60 olduğu gözlemlenmiştir.

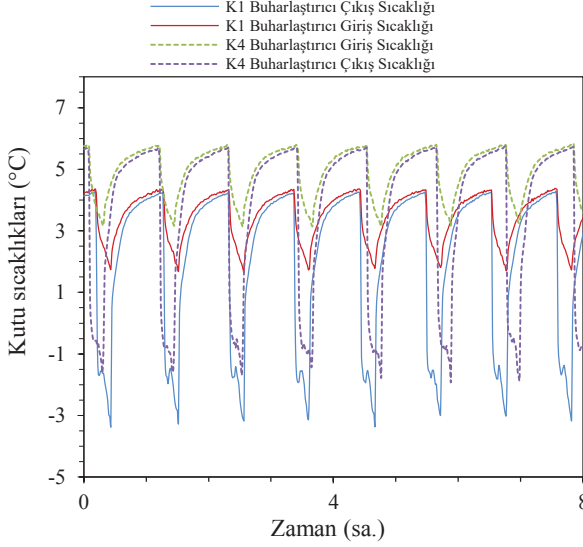


Şekil 12. K1 -Gündüz Modu için Kompresör Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

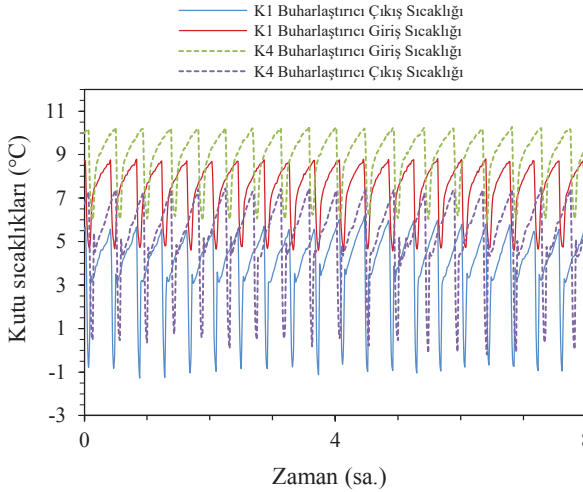


Şekil 13. K1 -Gece Modu için Kompresör Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

K1 ve K4 gündüz ve gece modları için Buharlaştırıcı üzerinden akan hava sıcaklıklarının zamana göre dağılımı sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15 ile gösterilmiştir. Grafikler gösterim kolaylığı açısından 8 saatlik periyotlar halinde sunulmuştur.



Şekil 14. K1 ve K4 Gündüz Modu İçin Buharlaştırıcı Hava Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi



Şekil 15. K1 ve K4 Gece Modu İçin Buharlaştırıcı Hava Sıcaklıklarının Zaman Göre Değişimi

Tablo 3 ile kompresörde, dryerde ve buharlaştırıcıda ölçülen sıcaklıkların maksimum ve minimum değerleri sayısal olarak gösteriştir. Tablo 3, Şekil 12, 13, 14 ve 15 ile verilen grafiklerin bir özeti olarak değerlendirilebilir.

Tablo 3. Sıcaklık Ölçüm Noktalarının Maksimum Ve Minimum Değerleri (°C)

	K1 Gündüz		K4 Gündüz		K1 Gece		K4 Gece	
	maks	min	maks	min	maks	min	maks	min
Sıcaklık ölçüm noktaları								
Kompresör giriş sıcaklığı	38.2	1.37	37.9	2.72	34.2	1.8	34.3	3.47
Kompresör Çıkış sıcaklığı	73.2	33.3	73.3	32.8	66.3	33.2	66.2	32.9
Dryer sıcaklığı	39.7	16.9	40.1	17.4	39.1	16.5	39.4	16.3
Kompresör yüzey sıcaklığı	56.3	41.7	56.0	40.9	47.5	41.3	47.2	41.2
Buharlaştırıcı hava giriş sıcaklığı	4.4	1.7	5.8	3.1	8.8	4.52	10.3	5.9
Buharlaştırıcı hava çıkış sıcaklığı	4.3	-3.5	5.8	-1.9	6.3	-1.3	8.0	-0.1

Deney sonuçlarının özeti Tablo 4 ile verilmiştir. K1-gündüz ve K1-gece deneylerinde sırasıyla, toplam 3.255 kWh ve 1.379 kWh enerji harcanmıştır. K4 sıcaklık sınıfındaki deneylerde ise bu değerler gündüz modunda 3.089 kWh ve gece modunda 1.341 kWh olarak ölçülmüştür.

Tablo 4. 24 Deneş Sonuçlarının Özetİ

Deneş değişkenleri	Birim	K1 Gündüz	K4 Gündüz	K1 Gece	K4 Gece
Test odası sıcaklığı	°C	25	25	25	25
Test odası nemi	%	60	60	60	60
Maksimum kutu sıcaklığı	°C	4.7	6	7.4	9
Ortalama kutu sıcaklığı	°C	3.1	4.6	5.2	6.8
Minimum kutu sıcaklığı	°C	1.7	3	3.2	4.7
Kompresör çalışma yüzdesi	%	23.54	21.39	14.1	13.68
Kompresör aç/kapa frekansı	1/saat	1.03	0.96	2.48	2.22
Maksimum harcanan güç	W	410	414	389	392
Toplam tüketilen enerji	kWh	3.255	3.089	1.379	1.341

Sonuç olarak, K1 ve K4 sıcaklık sınıflarındaki gündüz modundaki ortalama sıcaklık farkı 1.5°C ve gece modundaki ortalama sıcaklık farkı ise 1.6°C olarak ölçülmüştür. Bu ortalama sıcaklık farkları sonucunda, K1 sıcaklık sınıfındaki enerji tüketimi K4 sıcaklık sınıfına göre, gündüz modunda %5.37 ve gece modlarında ise %2.83 daha yüksek olarak ölçülmüştür.

#### 4. Tartışma

Bu çalışmada, ticari dikey ve kapalı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusu kutuların K1 ve K4 sıcaklık sınıflarındaki ve sistemin gece-gündüz modlarındaki enerji tüketimi değerleri ve diğere soğutma sistemi bileşenlerinin sıcaklık verileri deneşsel olarak incelenmiştir. TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak gerçekleştirilen gündüz modu deneylerinin, her iki sıcaklık sınıfında da başarılı olduğu gösterilmiştir. Gündüz modundaki tüm deneylerde, tüm kutu sıcaklıkları belirlenen maksimum ve minimum değerler arasında kalmış olup, kutuların ortalama sıcaklıkları ise belirlenen ortalama limit sıcaklığının altında kalmıştır. Dahası, gündüz modunda, kutuların ortalama sıcaklıklarındaki 1.5°C'lik bir değişim neticesinde enerji harcanmasında %5.37 değerinde bir artış olduğu gösterilmiştir. Gece modunda ise, kutuların ortalama sıcaklıklarındaki 1.6°C sıcaklığındaki bir artış, enerji harcamasında %2.83 değerinde bir yükselişe yol açmıştır. Bu açıdan, bir soğutucu içerisindeki kutu sıcaklıklarının optimum sıcaklıkta tutulması, enerji verimliliği bakımından oldukça önemli olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir.

## Gösterimler

- COP : Soğutma etkinlik katsayısı  
HCFC : Kloroflorokarbon  
HFC : Hidroflorokarbon  
HFO : Hidrofloroolefin  
HC : Hidrokarbon  
CFC : Kloroflorokarbon  
ODP : Ozon inceltme potansiyeli  
GWP : küresel ısınma potansiyeli

## Kaynakça

- Chaomuang, N., Flick, D., Denis, A. ve Laguerre, O. (2019). Influence of operating conditions on the temperature performance of a closed refrigerated display cabinet. *International Journal of Refrigeration*, 103, 32-41. doi:10.1016/j.ij-refrig.2019.03.031
- Chaomuang, N., Flick, D. ve Laguerre, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the performance of retail refrigerated display cabinets. *Trends in Food Science & Technology*, 70, 95-104. doi:10.1016/j.tifs.2017.10.007
- Çengel, Y., & Boles, M., Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımı, 7. Baskı, Palme yayıncılık (2015)
- Elbel, S., Visek, M. ve Hrnjak, P. (2016). A Fair Comparison of CO<sub>2</sub> and Propane Used in Light Commercial Applications Featuring Natural Refrigerants.
- Fricke, B. ve Becker, B. (2010). Energy Use of Doored and Open Vertical Refrigerated Display Cases.
- Gao, E., Cui, Q., Jing, H., Zhang, Z. ve Zhang, X. (2021). A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry. *International Journal of Refrigeration*, 128, 104-117. doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.03.025
- Gao, Y., He, G., Cai, D. ve Fan, M. (2020). Performance evaluation of a modified R290 dual-evaporator refrigeration cycle using two-phase ejector as expansion device. *Energy*, 212, 118614. doi:10.1016/j.energy.2020.118614
- Jwo, C.-S., Ting, C.-C. ve Wang, W.-R. (2009). Efficiency analysis of home refrigerators by replacing hydrocarbon refrigerants. *Measurement*, 42(5), 697-701. doi:10.1016/j.measurement.2008.11.006
- Kulkarni, S., Chavali, S. ve Dikshit, S. (2023). A review on analysis of Vapour Compression Refrigeration System (VCRS) for its performance using diffe-

- rent ecofriendly refrigerants and nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 72, 878-883. doi:10.1016/j.matpr.2022.09.085
- Mađerić, D., Pavković, B. ve Lenić, K. (2019). An experimental research on energy efficiency of a beverage cooler with the latent heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 148, 270-277. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.026
- Ocak, C., Koşan, M., Erten, S., Nur Erdoğmuş, F. ve Öder, M. (2023). Comparison of different compressor technologies for refrigerated display cabinet: Experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 81, 74-80. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.213
- Rasti, M., Ban, J. H. ve Jeong, J. H. (2017). Development of a continuous empirical correlation for refrigerant mass flow rate through non-adiabatic capillary tubes. *Applied Thermal Engineering*, 127, 547-558. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.070
- Robertson G., (2015) Trial Retrofit of Doors on Open Refrigerated Display Cabinets Final Report.
- Roy, Z. ve Halder, G. (2020). Replacement of halogenated refrigerants towards sustainable cooling system: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100027. doi:10.1016/j.cej.2020.100027
- Sánchez, D., Andreu-Nácher, A., Calleja-Anta, D., Llopis, R. ve Cabello, R. (2022). Energy impact evaluation of different low-GWP alternatives to replace R134a in a beverage cooler. Experimental analysis and optimization for the pure refrigerants R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a and R744. *Energy Conversion and Management*, 256, 115388. doi:10.1016/j.enconman.2022.115388
- Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R., Arauzo, I., Catalán-Gil, J. ve Torrella, E. (2017). Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze(E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives. *International Journal of Refrigeration*, 74, 269-282. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.09.020
- Sarker, D. ve Jeong, J. H. (2012). Development of empirical correlations for non-adiabatic capillary tube based on mechanistic model. *International Journal of Refrigeration*, 35(4), 974-983. doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.01.021
- Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R. I. ve Hafner, A. (2021). Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, 100807. doi:10.1016/j.tsep.2020.100807
- TS EN ISO 22044:2021, Ticari içecek soğutucuları Sınıflandırma, gereklilikler ve test koşulları.

- Van Beek, M. ve de Jong, H. (2014). Reducing Display Bottle Cooler Energy Consumption Using PCM As Active Thermal Storage.
- Wongwises, S. ve Chimres, N. (2005). Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator. *Energy Conversion and Management*, 46(1), 85-100. doi:10.1016/j.enconman.2004.02.011
- Xu, B. ve Bansal, P. K. (2002). Non-adiabatic capillary tube flow: A homogeneous model and process description. *Applied Thermal Engineering*, 22(16), 1801-1819. doi:10.1016/S1359-4311(02)00110-2
- Yadav, S., Liu, J. ve Kim, S. C. (2022). A comprehensive study on 21st-century refrigerants - R290 and R1234yf: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121947. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121947
- Zhao, H., Yuan, T., Gao, J., Wang, X. ve Yan, J. (2019). Conventional and advanced exergy analysis of parallel and series compression-ejection hybrid refrigeration system for a household refrigerator with R290. *Energy*, 166, 845-861. doi:10.1016/j.energy.2018.10.135
- Zheng, H., Tian, G., Zhao, Y., Jin, C., Ju, F. ve Wang, C. (2022). Experimental study of R290 replacement R134a in cold storage air conditioning system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36, 102203. doi:10.1016/j.csite.2022.102203