

**Atf İçin:** Mandev, E. (2025). Termoelektrik Buzdolaplarında Çoklu Düzenlemenin ve Elektrik Gücünün Soğutma Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 279-290.

**To Cite:** Mandev, E. (2025). Experimental Investigation of the Effects of Multiple Configurations and Electrical Power on the Cooling Performance of Thermoelectric Refrigerators. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(1), 279-290.

## Termoelektrik Buzdolaplarında Çoklu Düzenlemenin ve Elektrik Gücünün Soğutma Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Emre MANDEV

### **Öne Çıkanlar:**

- Termoelektrik soğutucuların performans analizi
- Çoklu düzenleme ve uygulanan gerilim soğutma performansına etkileri
- Deneysel çalışma

### **Anahtar Kelimeler:**

- Termoelektrik
- Soğutucu
- Performans katsayısı
- Soğutma performansı
- Soğutma yükü

### **ÖZET:**

Termoelektrik (TE) soğutma teknolojisi, kompakt ve hafif yapısı ile taşınabilir soğutma sistemlerinde popüler bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada, TE soğutucuların soğutma performansı ve enerji verimliliği üzerinde çeşitli tasarım parametrelerinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmada, aktif modül sayısı (1 ila 3 arasında) ve uygulanan besleme gerilim (8, 10 ve 12 V) gibi kritik değişkenlerin sistem performansına etkileri deneysel olarak ele alınmaktadır. Bu deneysel parametreler farklı soğutma hacimleri için incelenerek sonuçlar detaylandırılmıştır. Ayrıca bu parametrelerin soğutma kapasitesi, sıcaklık düşümü, COP ve enerji tüketimi üzerindeki etkileşimleri ortaya koyularak, TE soğutma teknolojisinin performanslarını geliştirme yollarını araştırılmıştır. Elde edilen bulgular daha büyük soğutma hacimlerinde termodinamik açıdan daha verimli TE soğutma sistemlerinin uygulanabileceğini göstermektedir. Buna karşın küçük hacimlerde daha düşük kararlı hal sıcaklıkları elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan besleme geriliminin geometrik parametrelere göre optimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmış ve en etkili soğutma yükü 10 V besleme gerilimi ve 3P modu için elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, termoelektrik soğutma sistemlerinin tasarımı ve işletilmesinde karşılaşılan zorlukları aşmak için kritik parametrelerin derinlemesine anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır. Aktif modül sayısı ve uygulanan besleme geriliminin optimizasyonu, bu teknolojinin farklı uygulama alanlarına uyum sağlamasını ve enerji verimliliğini artırarak daha geniş bir kullanım potansiyeline ulaşmasını sağlayacak temel unsurlardır.

## Experimental Investigation of the Effects of Multiple Configurations and Electrical Power on the Cooling Performance of Thermoelectric Refrigerators

### **Highlights:**

- Performance analysis of thermoelectric coolers
- Effects of multiple arrangements and applied voltage on cooling performance
- Experimental study

### **Keywords:**

- Thermoelectric
- Refrigeration
- Coefficient of performance
- Cooling performance
- Cooling load

### **ABSTRACT:**

Thermoelectric (TE) cooling technology offers a popular solution for portable cooling systems due to its compact and lightweight structure. This study experimentally investigates the impact of various design parameters on the cooling performance and energy efficiency of TE coolers. The effects of critical variables such as the number of active modules (ranging from 1 to 3) and the applied supply voltage (8, 10 and 12 V) on system performance have been experimentally evaluated. These experimental parameters were examined across different cooling volumes, with detailed results presented. Additionally, the interactions of these parameters with cooling capacity, temperature reduction, COP, and energy consumption were explored to identify ways to enhance the performance of TE cooling technology. The findings indicate that TE cooling systems can be more thermodynamically efficient in larger cooling volumes. On the other hand, lower steady-state temperatures were achieved in smaller volumes. It has also emerged that the applied supply voltage needs to be optimized according to geometric parameters, with the most effective cooling load obtained at a 10 V supply voltage and a 3P mode. In conclusion, this study underscores the importance of a thorough understanding of critical parameters to overcome the challenges encountered in the design and operation of thermoelectric cooling systems. The optimization of the number of active modules and the applied supply voltage are fundamental elements that will enable this technology to adapt to various application areas and achieve greater energy efficiency and broader usage potential.

## GİRİŞ

Soğutma sistemleri, günümüzde birçok sektörde kritik görevler icra etmektedir. Yiyecek ve içeceklerin saklanması, elektronik cihazların ve bileşenlerinin soğutulması, ilaçların belirli koşullarda depolanması gibi birçok alanda etkili soğutma sistemlerine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır (Mirmanto ve ark., 2019). Geleneksel olarak, bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan soğutma sistemleri genellikle sıkıştırma prensibine dayanan kompresörler barındırmaktadır. Ancak, bu sistemlerin nispeten büyük ve ağır bileşenler içermesi ve yüksek enerji tüketimleri; taşınabilir, hafif ve kompakt bir soğutma sistemi gerektiren bazı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır (Afshari ve ark., 2016; Khanlari ve ark., 2020).

Bu bağlamda, termoelektrik (TE) soğutma sistemleri, mevcut buhar sıkıştırma sistemlerine alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemler, taşınabilirlik ve bakım kolaylığı gibi avantajlar sunarak belirli uygulamalar için ideal bir seçenek olarak görülmektedir (Dai ve ark., 2003). Ancak, TE soğutma sistemlerinin performansı, özellikle performans katsayısı (COP) açısından bazı sınırlamalara sahiptir ve bu durum, TE soğutma teknolojisinin daha geniş bir kabulünü engellemektedir (Abdul-Wahab ve ark., 2009; Martínez ve ark., 2016). Bu nedenle, TE teknolojisinin soğutma uygulamalarındaki potansiyelini tam anlamıyla açığa çıkarmak için geliştirilmiş tasarım ve işletme stratejileri üzerine yapılan araştırmalar giderek daha büyük bir önem kazanmaktadır. Bu hususa örnek olarak Afshari ve ark. (2022), Mandev ve ark. (2023), Çolak ve ark. (2023), Muratçobanoğlu ve ark. (2024a) ve Umut ve Akal (2024) tarafından yürütülen çalışmalar gösterilebilir.

TE soğutuculara yönelik önemli mühendislik gelişmelerinden birinin incelendiği kapsamlı bir çalışma Gökçek ve Şahin (2017) tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmadaki TE soğutucular, sıcak taraftaki modülün soğutulmasında su kullanarak tasarlanmış bir mini kanal sistemiyle geliştirilmiştir. Bu sistem, farklı çalışma koşullarında COP değerlerinin gözlemlendiği bir dizi deney ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, su akış hızları ve elektrik gerilim seviyeleri, sistem performansının optimize edilmesi için test süresince dikkatle ayarlanmıştır. Bir başka çalışmada ise çok aşamalı TE soğutucular tasarlanmış ve detaylı olarak incelenmiştir. Çok aşamalı TE soğutucu tasarımıyla soğutma oran ve COP değerinin artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışmada TE modülünü için kullanılan elektrik akımı ve enerji tüketimi Cheng ve ark. (2006) tarafından optimize edilmiştir.

Ohara ve ark. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışma, taşınabilir bir termoelektrik aşı soğutma sistemi için optimize stratejiler sunulmaktadır. Bu çalışmada, termoelektrik modüllerin optimum akımını ve geometrisini belirlemek için bir modelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Prototip, geliştirilen model doğrultusunda inşa edilmiş ve minimum 3.4 °C sıcaklıkta aşılarda muhafaza edebilme kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, modül geometrisinin optimize edilmesi ile güç tüketimini %50 azaltılırken sıcaklık farkını iki katına çıkarılabileceği öne sürülmüştür. Bu çalışma, taşınabilir aşı taşıma sistemlerinin geliştirilmesinde termoelektrik soğutmanın potansiyelini ortaya koymuştur. Muratçobanoğlu ve ark. (2024b) ise, sıvı soğutmalı ısı alıcıya sahip termoelektrik soğutucunun soğutma performansını inceleyen sayısal ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, hava-su mini termoelektrik soğutma sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Farklı konfigürasyonlarda termoelektrik modüller kullanılarak ve farklı seviyede besleme gerilimleri uygulanarak gerçekleştirilen deneylerde, sistemin soğutma kapasitesi ve COP değerleri analiz edilmiştir. Ayrıca, sıvı akış hızının sistem performansı üzerindeki etkisi ve giriş-çıkış bölümleri arasındaki sıcaklık farkı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada 0.011 kg/s kütle akış hızı ve 12 V besleme gerilimi koşullarında, TE soğutucusundaki modül sayısı 1'den 3'e çıkarıldığında soğutma yükünde maksimum %35 artış elde edilmiştir. Bir mini TE buzdolabı sisteminin üretildiği ve optimum çalışma koşullarının elde edildiği bir çalışma ise Çağlar

(2018) tarafından yürütülmüştür. Ana bileşen olarak bir Peltier modülünün kullanıldığı bu çalışmada buzdolabı olarak kullanılan soğutma odası, sıcak ve soğuk taraflarından Peltier-fan entegrasyonu ile donatılmıştır. Deneyler neticesinde soğutma odasının sıcaklığının 20 °C'den -18 °C'ye düşürülebileceği gösterilmiştir. Buna karşın COP değerinin çalışma sürecinde 0.3'ten 0.01'e kadar düştüğü ortaya konulmuştur. Tan ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada ise TE soğutma sistemlerinin optimum çalışma koşullarını tahmin etmek için ikinci kanun analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik, elektrik akımı ve soğutma sıcaklığı gibi farklı parametrelerin soğutma cihazının performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

TE soğutma performansını tasarlama ve optimize etme sürecinde termal, elektriksel ve geometrik parametreleri kapsamlı bir şekilde değerlendirildiği bir çalışma Hao ve ark. (2020) tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmada ise boyutsal analiz yöntemi kullanılarak TE soğutucunun performansını analiz etmek için boyutsuz soğutma gücü, çalışma akımı ve termal iletkenlik gibi boyutsuz katsayılar türetilmiştir. Çalışma akımı ile ilgili boyutsuz katsayıda dahil olmak üzere belirlenen tüm boyutsuz katsayıların, TE soğutma performansını iyileştirmek için önemli olduğu ve soğutma gücü, soğuk tarafın sıcaklığı ve enerji dönüşüm verimliliğinin bu katsayılara bağlı olduğu ileri sürülmüştür. Çalışma neticesinde deney ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gösterilmiş ve ayrıca bu boyutsuz katsayıların TE soğutucunun kapsamlı analizi ve optimizasyonu için geçerli ve kullanışlı olduğunu belirtilmiştir.

Moazzez ve ark. (2020) ise otomobillerdeki klima sistemleri için bir alternatif olarak TE kullanımını inceleyen sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan ısı emicilerin tasarımında uygun bir yaklaşımın soğutma sisteminin performansını artırabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sonuçlar soğutma performansının TE modüle uygulanan akım ve gerilim değerlerinden kuvvetli şekilde etkilendiğini göstermektedir.

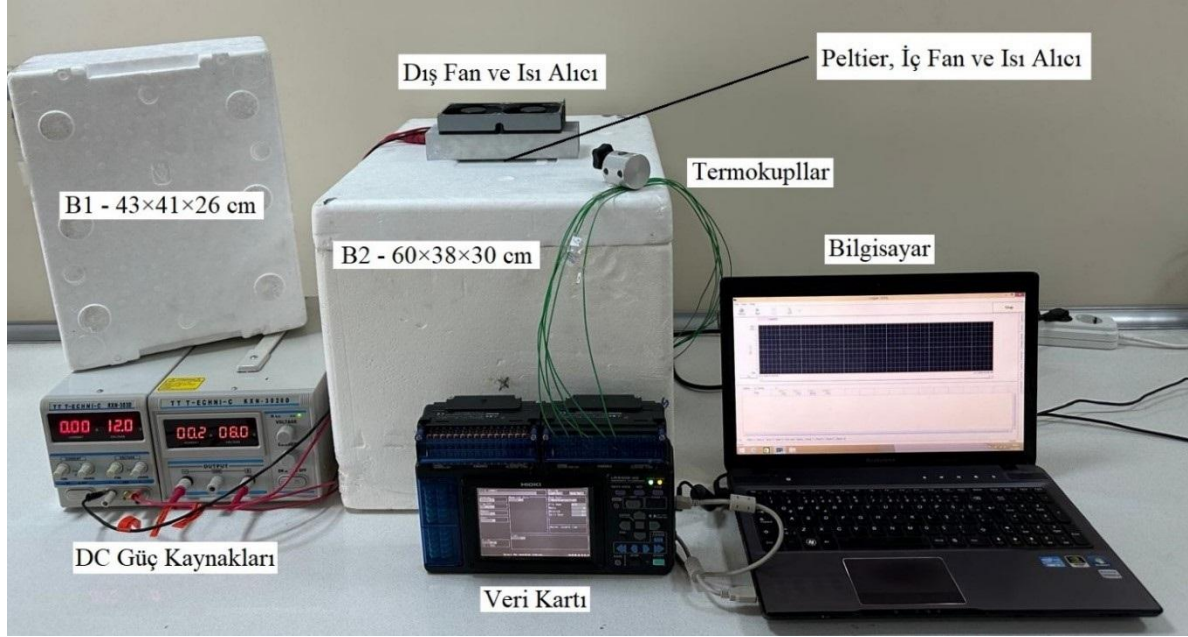
TE soğutma, Peltier etkisi olarak bilinen fiziksel bir etkiyi kullanır. TE modüller, iki farklı iletken malzeme arasında bir sıcaklık farkı oluşturarak çalışırlar. TE modül üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde, cihaz yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşur ve bu fark elektrik gücünün artışıyla artar. Bu nedenle, bir yüzey soğuturken diğer yüzey ısınır. Bu prensip, sıcaklığı düşürmek veya artırmak amacıyla kullanılabilir. Yukarıdaki literatür özetinde de ortaya konulduğu gibi TE soğutucuların ve buzdolaplarının performansını artırmak için, akım ve gerilim optimizasyonu kritik bir rol oynamaktadır. Akım yoğunluğu ve gerilim düzeyi, TE modüllerin soğutma kapasitesini ve verimliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, bu faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, daha etkili ve enerji verimli TE soğutucuların tasarlanmasına olanak tanır. İşte bu sebeple bu çalışmada, farklı boyutlarda buzdolabı tipi hava-hava TE soğutma sistemleri tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu termoelektrik buzdolapları üzerinde sistemin performansını artırmak amacıyla farklı Peltier modül diziliminin ve uygulanan geriliminin etkisi incelenmektedir. Bu çalışma, TE buzdolabı ve soğutma sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımları araştırmak ve gelecekteki uygulamalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

## MATERYAL VE METOT

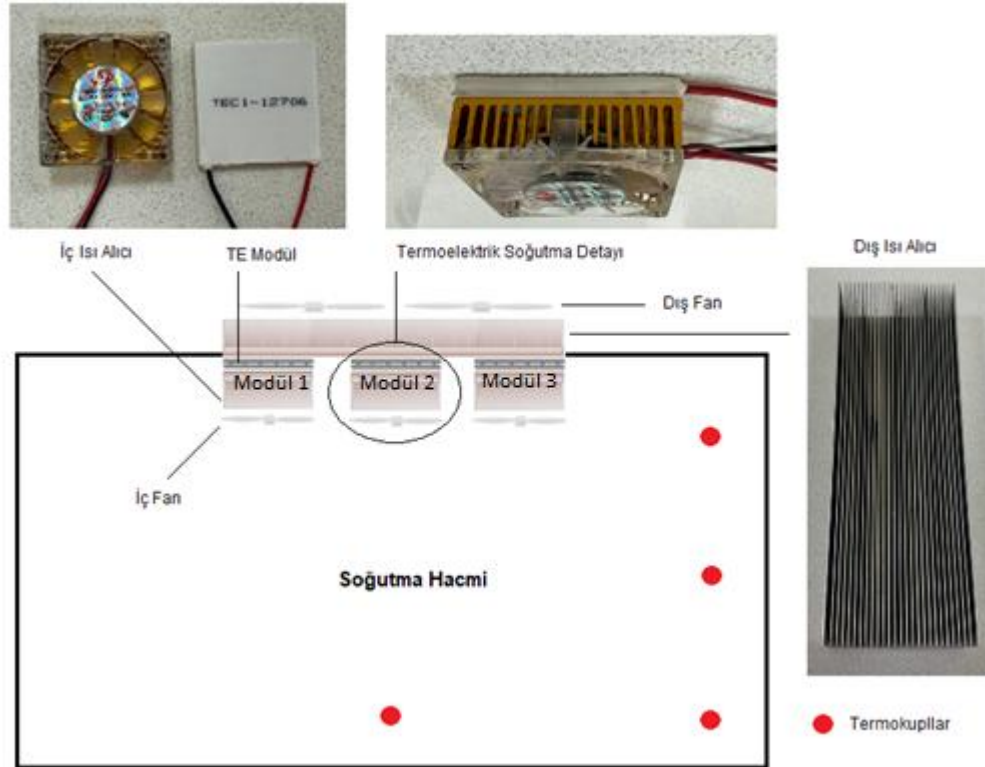
### Deney Düzenekinin Kurulumu

Bu çalışmada, TE soğutma sisteminin farklı çalışma koşulları altındaki performansını değerlendirmek için polistiren köpükten yapılmış iki farklı buzdolabı (soğutma odası) tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu soğutma odalarının ölçüleri sırasıyla 43×41×26 cm (B1 – 0.046 m<sup>3</sup>) ve 60×38×30 cm'ye (B2 – 0.068 m<sup>3</sup>) karşılık gelmektedir. Belirtilen iki farklı soğutma odasının tasarlanmasının nedeni, termoelektrik modüllerin farklı hacimlerdeki performansını karşılaştırmak ve bu soğutma teknolojisinin

potansiyelini farklı soğutma hacimleri gerektiren uygulama alanları için değerlendirmektedir. Bu iki farklı hacim, soğutucuların termal performansını, soğutma kapasitesini ve enerji tüketim verimliliğini etkileyen faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için kullanılmıştır. Soğutma odasında kullanılan polistiren malzemenin termal iletkenliği  $0.039 \text{ W/mK}$ 'dir. Bu malzeme, 40 mm kalınlığında soğutma odasının tamamında kullanılmıştır. Bu kullanım ile ısı kayıpları ihmal edilebilir düzeylere düşürülmüştür. Havadan havaya TE buzdolabı deney düzeneğimin görseli Şekil 1'de sunulmaktadır. Ayrıca bazı detayları içeren şematik bir görsel ise Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1. TE buzdolabı deney düzeneği fotoğrafı



Şekil 2. TE buzdolabı deney düzeneği şematik resmi ve detayları

**Termoelektrik Buzdolaplarında Çoklu Düzenlemenin ve Elektrik Gücünün Soğutma Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi**

Şekilde görüldüğü üzere soğutma hacminin üst bölümünde yer alan TE modüllerinin üzerine iç ve dış ısı alıcılar olmak üzere genişletilmiş yüzeyler ilave edilmiştir. Bu ısı alıcılar etkin bir ısı transferi sağlamak ve yüksek taşınım katsayıları elde etmek amacıyla fanlar ile desteklenmiştir. Bu şekilde havadan havaya zorlanmış taşınım mekanizmasıyla ısı transferi sağlanmıştır. İç ve dıştaki ısı değiştiricilerinin ölçüleri sırasıyla 4×4×1 cm ve 20×7×3.5 cm olarak seçilmiştir. Peltier ile her iki yönde bulunan ısı alıcıların, ısıl temas direncine sebebiyet verebilecek katı temas yüzeyleri bulundurduğu görülmektedir. Bu yüzeylerdeki ısıl temas direncini bertaraf amacıyla HY510 ısı transfer macunu kullanılmıştır. Soğutma sistemlerinin ana bileşenleri ise olarak, 40×40×4 mm boyutlarındaki TEC1-12706 tipi TE modülleri seçilmiştir. Deneyler boyunca bu modüller 8V, 10V ve 12V besleme gerilimleri çalıştırılmıştır. Ayrıca deneyler tek (1P), çift (2P) ve üçlü (3P) modül dizilimleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TE modüllerin çalışma durumlarının ve dizilim modlarının detayları aşağıda çizelge halinde sunulmuştur (Çizelge 1).

**Çizelge 1.** TE modüllerin çalışma durumları

TE Modül 1	Çalışma Durumu			Dizilim Modu
	TE Modül 2	TE Modül 3		
✓	✗	✗		1P Modu
✓	✓	✗		2P Modu
✓	✓	✓		3P Modu

\*TE: Termoelektrik

Soğutma odaları içindeki sıcaklık değişimleri, farklı hacimlerdeki soğutma odaları içerisine konumlandırılmış dörder adet termokupl kullanılarak izlenmiştir. Burada kullanılan termokupllar K-tipi olarak seçilmiştir ve ölçüm doğrulukları %1 olarak verilmektedir. Ayrıca kullanılmadan önce termokupllar -10 ila 48 °C arasındaki 3 °C aralıklarla kalibre edilmiş ve hesaplamalarda kullanılmak üzere kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Soğutma odalarından elde edilen veriler, 0.01 °C çözünürlüğe sahip Hioki LR8402-20 model veri kaydedici ile bilgisayara aktarılmıştır. Burada kaydedilen sıcaklık verilerinin ortalamaları alınarak analizler ve hesaplamalarda kullanılmıştır. TE modüllerin ve fanların güç beslemesinde DC güç kaynaklarından yararlanılmıştır. Ayrıca, bu cihazların enerji tüketimini hesaplamak için akım ve gerilim değerleri de deneyler boyunca kaydedilmiştir. Deney düzeneğinin kurulumunda kullanılan ekipmanların teknik özelliklerine dair bazı detaylar ve ölçüm belirsizlikleri aşağıda Çizelge 2’de sunulmuştur.

**Çizelge 2.** Ekipmanların teknik özellikleri ve ölçüm belirsizlikleri

Ekipman	Teknik Özellikler	Ölçüm Belirsizlik
DC Güç Kaynakları	TT Technic marka, RXN-3020 ve KXN-3020D model, Gerilim Çıkışı: 0-30 V, Akım Çıkışı: 0-20 A, Tek kanallı	±3mV ±2mA
Termokupllar	Pozitif tel (Kromel - NiCr): Yeşil, Negatif tel (Alumel - NiAl): Beyaz K-tipi, kablo/tel çapı 1/0.2 mm	±%1
TE Modül	TEC1-12706, $V_{max}$ : 12 – 15 V ve $I_{max}$ : 4 – 6 A $T_{max}$ : 70 °C ve $Q_{c,max}$ : 55 W	-
Isı Alıcı Fanları (İç)	CD-FAN marka 6×6×1.5 cm boyutlarında 12 V – 0.2 A DC	-
Isı Alıcı Fanları (Dış)	CD-FAN marka 4×4×0.5 cm boyutlarında 12 V – 0.1 A DC	-

\*DC: Doğru akım

## Analiz ve Hesaplamalar

Soğutma ve ısıtma sistemlerinin analizinde ve aynı zamanda buzdolapları ve termoelektrik soğutma sistemlerinde performans COP değerleri ile kıyaslanabilir (Afshari, 2021). Termodinamik açıdan, toplam COP, soğutma odasından transfer edilen termal enerjinin tüketilen enerjiye bölünmesi ile hesaplanır ve bu prosedür aşağıda Eşitlik 1’de sunulmuştur. Bu eşitlikte, toplam enerji tüketimi için Peltier modülleri ve fanlar gibi elektrik enerjisi tüketen tüm elemanlar dikkate alınmalıdır;

$$COP = \dot{Q} / (\dot{W}_{TE} + \dot{W}_{Fan}) \quad (1)$$

Burada elektrikle çalışan cihazların güç tüketimleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Eşitlik 2):

$$\dot{W} = VI \quad (2)$$

Eşitlik 2’de verilen V ve I sırasıyla gerilim ve elektrik akımı değerlerini temsil eder. Bunun yanında sistemin soğutma hızını hesaplamak için soğutma odası içindeki hava kütlelerini de bilmek gerekir. Hava kütlesi, odanın hacmi ve hava yoğunluğu kullanılarak Eşitlik 3’de verildiği haliyle elde edilebilir:

$$m = \rho v \quad (3)$$

Soğutma kutusundan çevreye transfer edilen termal enerji ise Eşitlik 4’de verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$\dot{Q} = mCp(T_{ort,f} - T_{ort,i})/t \quad (4)$$

Burada  $T_{ort,f}$  ve  $T_{ort,i}$  sırasıyla deney sonunda ve başlangıcında soğutma odasından elde edilen anlık ortalama sıcaklık değerleridir ve m ise kutu içindeki hava kütleleridir. Yürütülen deneyler sırasında oda sıcaklıkları 22 °C civarında seyretmektedir. Bu sebeple akışkan özellikleri bu sıcaklık değeri ve atmosfer basıncı kullanılarak belirlenmiştir. Soğutucular içerisindeki kütle sabit kaldığından yoğunluk değişimleri, sıcaklık değişimleri ile oluşacak farkın %1’den az olması sebebiyle de özgül ısı değişimleri ihmal edilmiştir.

Genel olarak, deneysel araştırmalardaki belirsizlik, materyal seçimi, kalibrasyon, gözlem, okuma, zamanlama ve bazen çevresel hatalar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir (Tuncer ve ark., 2021).

Bu bağlamda, deneysel olarak ölçülen değerlerdeki belirsizlikler, hesaplamalarda matematiksel ilişki şeklinde verilmektedir. Genellikle, çıkış değişkeni y'nin, giriş değişkenleri  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 'e bir fonksiyon olarak bağlı olduğu varsayılırsa, çıkış değişkeninin birleşik deneysel belirsizliği  $u_c(y)$ , giriş verilerinin belirsizlikleri  $u(x_i)$  kullanılarak aşağıdaki denklemle (Eşitlik 5) hesaplanabilir:

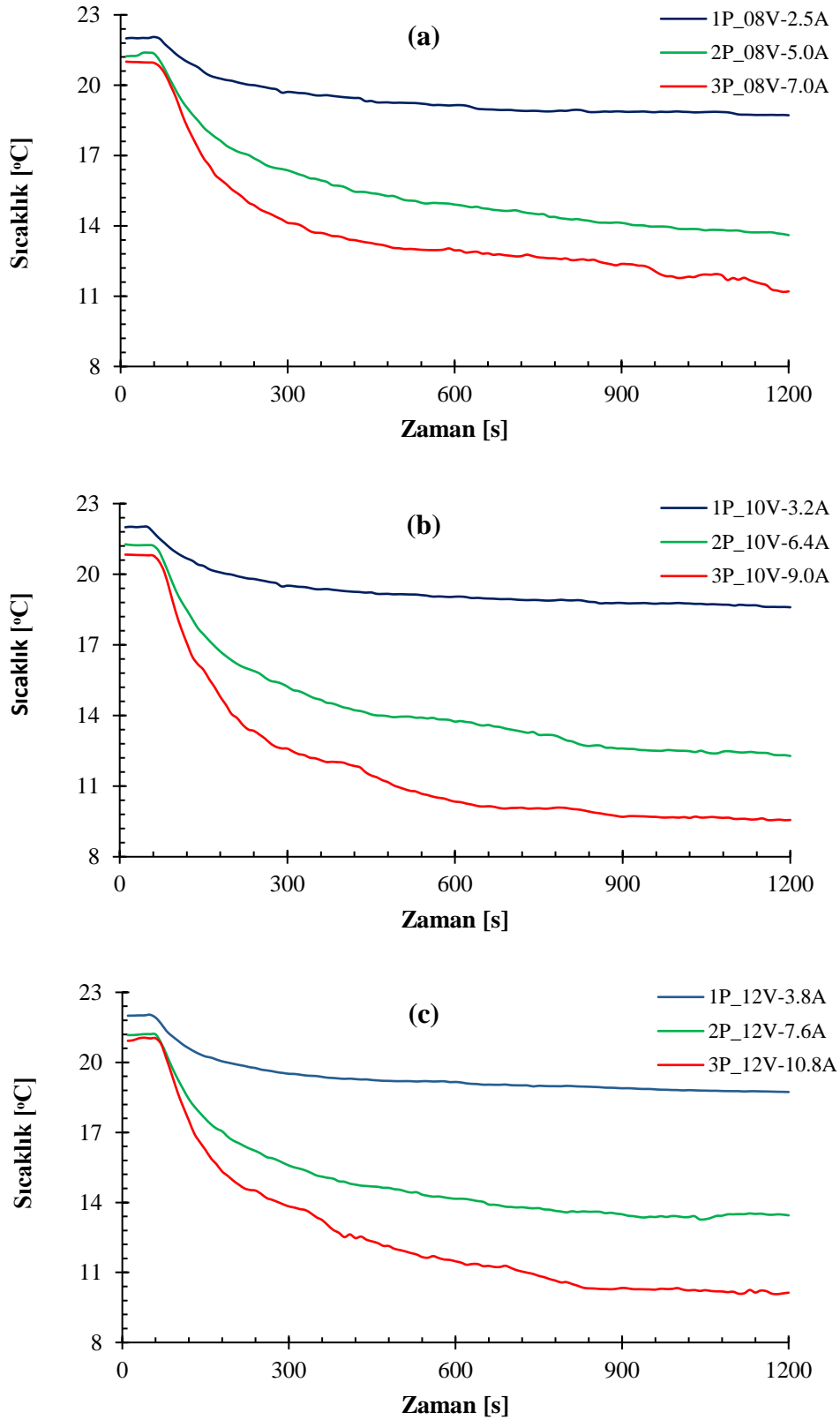
$$u_c(Y) = \sqrt{\left[\frac{\partial Y}{\partial X_1} u(X_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial Y}{\partial X_2} u(X_2)\right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial Y}{\partial X_n} u(X_n)\right]^2} \quad (5)$$

Hesaplanan COP değeri soğutma odasının koşullarına ek olarak TE modül ve elektronik bileşenler için tüketilen enerjinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle tasarlama soğutucular için COP belirsizliği Eşitlik 6’da verildiği haliyle hesaplanmıştır. COP için elde edilen en yüksek belirsizlik  $\pm 3.8\%$  seviyesindedir.

$$u_{COP} = \sqrt{\left[\frac{\partial COP}{\partial T_1} u(T_{ort,f})\right]^2 + \left[\frac{\partial COP}{\partial T_2} u(T_{ort,i})\right]^2 + \left[\frac{\partial COP}{\partial I} u(I)\right]^2 + \left[\frac{\partial COP}{\partial V} u(V)\right]^2} \quad (6)$$

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, iki farklı boyutta tasarlanan soğutucular (B1 ve B2) üzerinde gerçekleştirilmiş deneylerin sonuçları detaylı olarak diyagramlarla halinde sunulmuştur. Her iki soğutma haznesi ve tüm deneysel parametreler için hazne sıcaklıkları 1200 s süresince kayıt altına alınmıştır. Deney planında besleme gerilimi belirlenen seviyelere ayarlanmış (8, 10 ve 12 V) modüllerin kendi iç dirençleri oranında akım çekmesine müsaade edilmiştir.



Şekil 3. B1 soğutma haznesi için farklı çalışma modlarında zamana bağlı sıcaklık değişimleri  
a) 8 V, b) 10 V ve c) 12 V besleme gerilimi

Şekil 3a, b ve c’de sırasıyla 8, 10 ve 12V besleme gerilimi için B1 haznesi içerisinde elde edilen zamana bağlı sıcaklık değişimleri verilmektedir. Burada verilen her bir grafikte 1P, 2P ve 3P olmak

üzere çalışma modlarına ait eğriler yer almaktadır. Benzer durum Şekil 4'de B2 haznesi için geçerlidir. Her bir diyagram üzerinde 8, 10 ve 12V besleme gerilimi için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

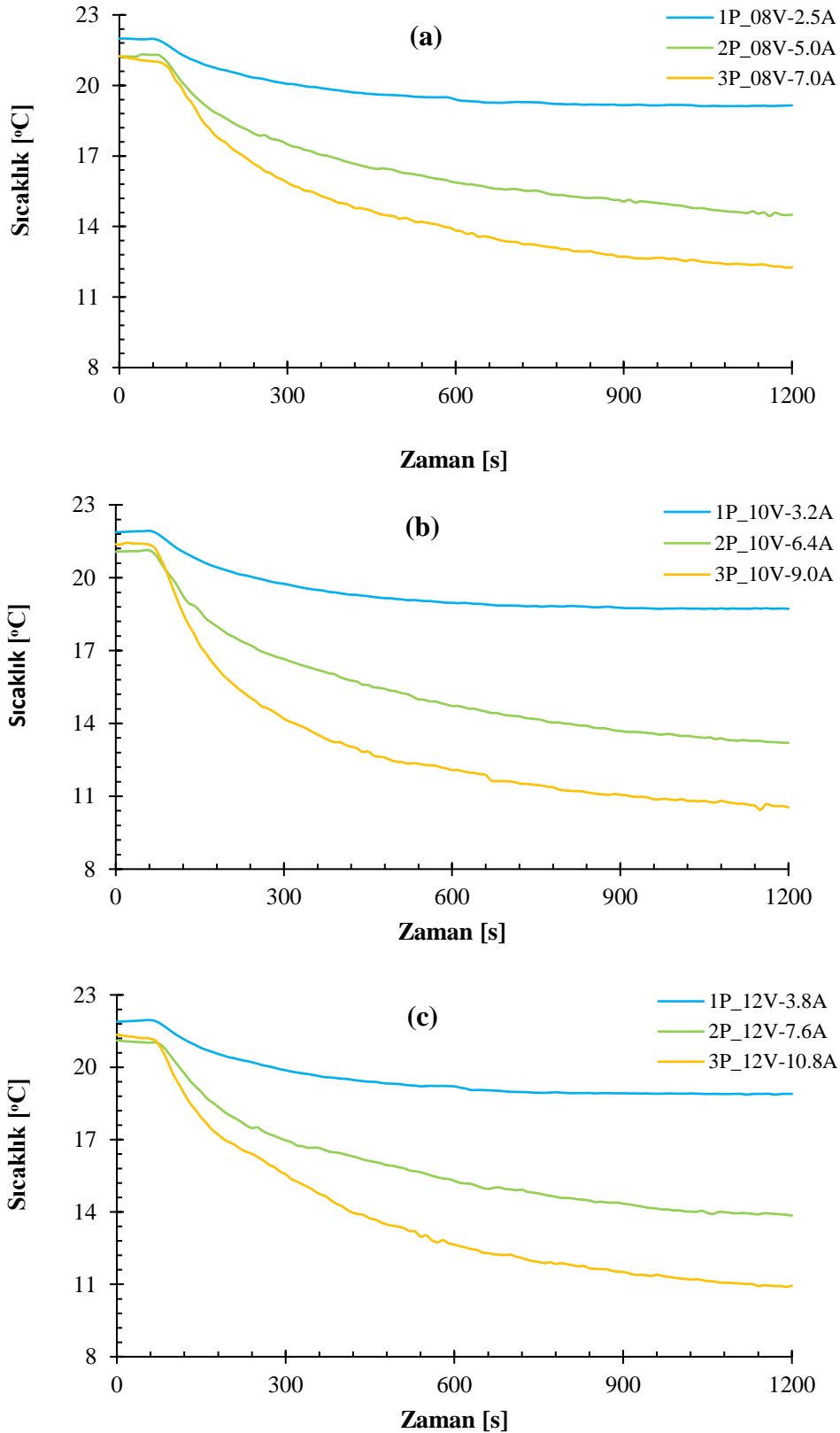
Şekil 3 ve 4 beraber incelenecek olursa, hazne boyutları ve besleme geriliminden bağımsız olarak TE modül sayısının artırılması beklenildiği üzere daha düşük hazne sıcaklıklarının elde edilmesine neden olmuştur. Fakat bu durum besleme için gerekli olan elektrik enerjisinde artışla sonuçlanmaktadır. Bir başka beklenen durum ise nispeten küçük hacimli olan B1 haznesinde, büyük hacim olarak değerlendirilen B2 haznesine göre daha düşük kararlı hal sıcaklıklarının gözlemlenmesidir. Bunun yanında her iki soğutma haznesi ve tüm çalışma modları için en düşük sıcaklık değerleri 10V besleme geriliminde gözlemlenmiştir (Şekil 3b ve 4b).

Besleme geriliminin 8 V'dan 10 V'a çıkarılmasıyla hazne sıcaklıklarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Buna karşın 10 V'dan 12V'a geçişte hazne son sıcaklıkları bir miktar artmıştır. Bu durum TE modülün sıcak tarafındaki ısı etkileşimlerinin yetersizliğinden ileri gelmektedir. TE modüllerin daha yüksek elektrik enerjileriyle beslenmesi durumunda daha yüksek performans göstermesi beklenebilir fakat bunun yanında yüzeylerde biriken termal enerjinin de etkili şekilde uzaklaştırılması gerekir. Başka bir deyişle 12 V'a çıkarılan besleme gerilimi nedeniyle sıcak yüzeyde biriken termal enerji artmış ve sistemden yeterli oranda uzaklaştırılamamıştır. Bu durum 10 V besleme gerilimine nazaran modülün ve sistemin soğutma performansında bir miktar kayba neden olmuştur. Grafiklerde verilen sıcaklık eğrileri incelendiğinde tüm durumlar için deney sürecinin sonuna doğru kararlı bir sıcaklık değerine yaklaşıldığı söylenebilir. Beklenildiği gibi, kararlı hal durumu, enerji seviyesi daha düşük olan B1 haznesinde daha erken bir zamanda gerçekleşmiştir. Bu durum, B1 haznesinin daha küçük hacimde olması ve düşük madde miktarı nedeniyle daha hızlı soğumasından kaynaklanmaktadır. Deney süreleri sonucunda B1 haznesinde ve 10 V besleme geriliminde 1P çalışma modu için  $\Delta T=3.4$  °C, 2P çalışma modu için  $\Delta T=8.9$  °C ve 3P çalışma modu için  $\Delta T=11.4$  °C olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde B2 haznesi için 1P, 2P ve 3P çalışma modlarında sıcaklık düşüşleri ( $\Delta T$ ) sırasıyla 3.1, 8.2, 10.5 °C olarak gözlenmiştir.

Şekil 5'de B1 ve B2 soğutma hacimleri için elde edilen toplam soğutma yükleri ( $Q_c$ ) sütun grafiği halinde sunulmuştur. Grafikte farklı soğutma modları ve besleme gerilimleri için elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bir önceki şekilde verilen sıcaklık grafiklerine paralel olarak en yüksek soğutma yükü değerleri 3P modunda ve 10 V besleme gerilimi değerinde gözlenmiştir. Şekil 6'da ise mevcut soğutma hazneleri için ortalama COP değerlerini gösteren sütun grafikleri verilmiştir. Burada deney süresi boyunca ortalama değerlerin dikkate alınması sebebiyle sonuçların bir miktar düşük kalması söz konusudur. Bu durum hazne sıcaklıklarının belirli bir periyot sonunda kararlı hale gelmesinden ileri gelmektedir. İncelenen tüm durumlarda B2 haznesi için elde edilen COP değerlerinin B1 haznesine nazaran yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum enerji miktarı yönüyle ileride olan hacimce büyük haznedeki soğutmanın termodinamik verim yönüyle daha uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bunun yanında B2 haznesinde elde edilen minimum sıcaklıkların B1 haznesinin üstünde kaldığı unutulmamalıdır.

Başka bir deyişle hacimce büyük olan B2 haznesindeki soğutma termodinamik açıdan daha verimli olsa da B1 haznesinde daha düşük kararlı hal sıcaklıkları elde edilebilmiştir. Ortalama COP değerleri açısından bir değerlendirme yapıldığında en verimli çalışma şartları sırasıyla 2P, 3P ve 1P modları olmuştur. 2 adet TE modülün çalıştırıldığı 2P durumunda en yüksek COP sonuçları söz konusudur. 3P modunun sonuçları ise buna oldukça yakın seyretmiştir. Bunun yanında uygulanan besleme geriliminin artırılması ortalama COP değerlerinin dramatik şekilde azalmasıyla sonuçlanmıştır. Sonuç olarak en yüksek ortalama COP değerleri 2P modunda 8 V besleme geriliminde elde edilmiştir.

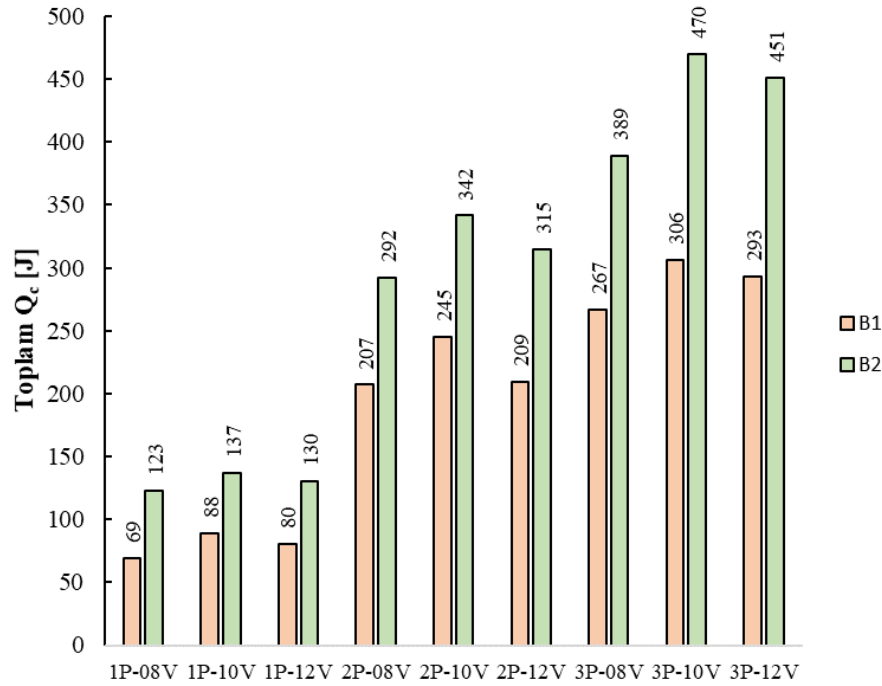




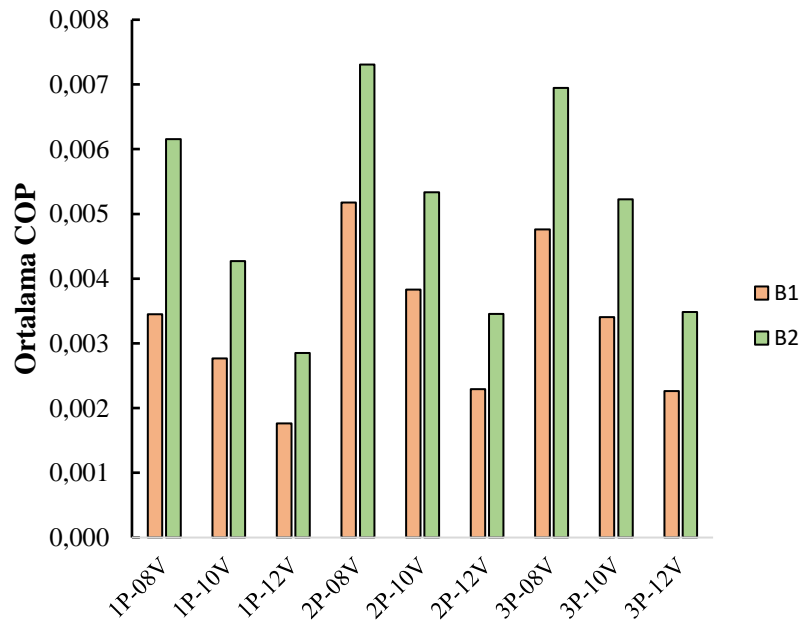
Şekil 4. B2 soğutma haznesi için farklı çalışma modlarında zamana bağlı sıcaklık değişimleri  
a) 8 V, b) 10 V ve c) 12 V besleme gerilimi

Başka bir deyişle Şekil 5’de soğutma hazneleri için verilen toplam soğutma yükü, deney süresince hazneden çekilen toplam ısıyı ifade etmektedir. Görüleceği üzere 3P–10V modu diğer konfigürasyonlar arasında en güçlü soğutmanın elde edildiği tasarımdır. Ancak en güçlü soğutma her zaman en verimli

çözüm olmayabilir. Termodinamik verim olarak en verimli konfigürasyon ise Şekil 6'da gösterilen soğutma hazneleri için ortalama COP değerleri grafiği üzerinden okunabilir. Termodinamik açıdan en iyi konfigürasyon ise 2P-8V modunda gözlenmiştir.



Şekil 5. Farklı Soğutma hazneleri için toplam soğutma yükü



Şekil 6. Farklı Soğutma hazneleri için ortalama COP değerleri

## SONUÇ

Bu çalışmada, TE soğutma sistemlerinin performansını artırmak amacıyla aktif TE modül sayısı (1-3 adet) ve uygulanan besleme gerilimi (8, 10 ve 12 V) gibi parametrelerin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İki farklı soğutma hacmi için yapılan deneyler neticesinde, modül sayısının artırılmasının soğutucunun kararlı hal sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürdüğü ve soğutma kapasitesini de belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Ancak enerji tüketiminin de bu oranda yükseldiği görülmektedir.

Farklı soğutma hacimlerinde yapılan deneyler, soğutma hacminin artmasıyla sistem verimliliğinin de arttığını ortaya koymaktadır. Buna karşın nispeten küçük soğutma hacimlerinde daha düşük kararlı hal sıcaklıkları elde edilebilmiştir. Deney süreleri sonunda B1 haznesinde ve 10 V besleme geriliminde 1P çalışma modu için  $\Delta T=3.4$  °C, 2P çalışma modu için  $\Delta T=8.9$  °C ve 3P çalışma modu için  $\Delta T=11.4$  °C olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde B2 haznesi için 1P, 2P ve 3P çalışma modlarında sıcaklık düşüşleri ( $\Delta T$ ) sırasıyla 3.1, 8.2, 10.5 °C olarak kaydedilmiştir.

İncelenen parametre grupları arasında, 10 V besleme gerilimi ve 3P modu, en etkili soğutma performansı ve sıcaklık düşümünü sağlamıştır. TE modüllerin daha yüksek elektrik enerjileriyle beslenmesi durumunda daha yüksek performans göstermesi beklenebilir fakat bunun yanında yüzeylerde biriken termal enerjinin de etkili şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Mevcut durumda 12 V'a çıkarılan besleme gerilimi nedeniyle sıcak yüzeyde biriken termal enerji artmış ve kurulan havadan havaya bu sistem ile yeterli oranda uzaklaştırılamamıştır. Bu durum 10 V besleme gerilimine nazaran 12 V besleme geriliminde modülün ve sistemin soğutma performansında bir miktar kayba neden olmuştur. Bu sonuçlara istinaden TE modüller üzerinde seçilen ısı transferi aygıtları ve mekanizmalarının soğutucuların performanslarını sınırlayan önemli bir unsurun olarak değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yani, TE modüllerle birlikte seçilen ısı alıcılar, soğutma plakaları veya diğer ısı dağıtım mekanizmaları, sistemlerin toplam soğutma etkinliğini belirleyen kritik elemanlardır. Bu elemanlar doğru seçilmediğinde veya yetersiz kaldığında, enerji beslemesi artırılrsa dahi soğutucuların performansı olumsuz yönde etkilenebilir ve beklenen soğutma kapasitesine ulaşamayabilir.

Bunun yanında termodinamik açıdan en verimli durum yani en yüksek COP değerleri 2P modu için gözlemlenmiştir. Ayrıca besleme geriliminin düşürülmesi COP değerlerinde dramatik artışlar ile sonuçlanmıştır. Sonuç olarak en yüksek ortalama COP değerleri 2P modunda 8 V besleme geriliminde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, TE soğutma sistemlerinin daha geniş uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılabilmesi için modül konfigürasyonlarının ve çalışma parametrelerinin dikkatlice seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, TE soğutucuların enerji verimliliğini artırma ve çevresel etkilerini azaltma potansiyelini de göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, çeşitli optimizasyon stratejileri geliştirilerek, TE soğutma teknolojilerinin sürdürülebilirliğini ve uygulanabilirliğini artırma yolunda önemli adımlar atılabilir.

## KAYNAKLAR

- Mirmanto, M., Syahrul, S., & Wirdan, Y. (2019). Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(1), 177-184.
- Afshari, F., Comakli, O., Adiguzel, N., Karagoz, S. (2016). Optimal charge amount for different refrigerants in air-to-water heat pumps. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 40(4), 325-335.
- Khanlari, A., Sözen, A., Sahin, B., Di Nicola, G., Afshari, F. (2020). Experimental investigation on using building shower drain water as a heat source for heat pump systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13.
- Dai, Y. J., Wang, R. Z., Ni, L. (2003). Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells. *Renewable energy*, 28(6), 949-959.
- Abdul-Wahab S A, Elkamel A, Al-Damkhi A M, Ishaq A, Al-Rubai'ey H S, Al-Battashi A K, Chutani M U. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renewable Energy*. 2009; 34(1): 30-34.

- Martinez A, Astrain D, Rodriguez A, Aranguren P. Advanced computational model for Peltier effect based refrigerators. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 95: 339-347.
- Afshari, F., Ceviz, M. A., Mandev, E., & Yıldız, F. (2022). Effect of heat exchanger base thickness and cooling fan on cooling performance of Air-To-Air thermoelectric refrigerator; experimental and numerical study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102178.
- Mandev, E., Muratçobanoğlu, B., Sahin, B., Teimuri-Mofrad, R., Rahimpour, S., & Afshari, F. (2023). Performance analysis of thermo-electric cooling systems equipped with surface-modified and recycled nanofluids. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 30(3).
- Çolak, A., Çelik, A., Mandev, E., Muratçobanoğlu, B., Gülmüş, B., Afshari, F., & Ceviz, M. A. (2023). Study on a novel inclined solar water distillation system using thermoelectric module for condensation. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 986-994.
- Muratçobanoğlu, B., Mandev, E., Ömeroğlu, G., Akpınar, F., Öz, E., & Afshari, F. (2024a). Experimental and numerical study on effects of new-generation finned heat exchanger on thermal performance of thermoelectric cooling systems. *Heat Transfer Research*, 55(5).
- Umut, İ., & Akal, D. (2024). Yapay zekâ tarafından kontrol edilen özgün bir termoelektrik CPU soğutma sistemi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University/Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1).
- Gökçek, M., Şahin, F. (2017). Experimental performance investigation of minichannel water cooled-thermoelectric refrigerator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 54-62.
- Cheng, Y. H., Shih, C. (2006). Maximizing the cooling capacity and COP of two-stage thermoelectric coolers through genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 937-947.
- Ohara, B., Sitar, R., Soares, J., Novisoff, P., Nunez-Perez, A., Lee, H. (2015). Optimization strategies for a portable thermoelectric vaccine refrigeration system in developing communities. *Journal of Electronic Materials*, 44(6), 1614-1626.
- Muratçobanoğlu, B., Mandev, E., Ceviz, M. A., Manay, E., & Afshari, F. (2024b). CFD simulation and experimental analysis of cooling performance for thermoelectric cooler with liquid cooling heat sink. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(1), 359-377.
- Çağlar, A. (2018). Optimization of operational conditions for a thermoelectric refrigerator and its performance analysis at optimum conditions. *International Journal of Refrigeration*, 96, 70-77.
- Tan, H., Fu, H., Yu, J. (2017). Evaluating optimal cooling temperature of a single-stage thermoelectric cooler using thermodynamic second law. *Applied Thermal Engineering*, 123, 845-851.
- Hao, J., Qiu, H., Ren, J., Ge, Z., Chen, Q., Du, X. (2020). Multi-parameters analysis and optimization of a typical thermoelectric cooler based on the dimensional analysis and experimental validation. *Energy*, 205, 118043.
- Moazzez, A. F., Najafi, G., Ghobadian, B., Hoseini, S. S. (2020). Numerical simulation and experimental investigation of air cooling system using thermoelectric cooling system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(4), 2553-2563.
- Afshari, F. (2021). Experimental and numerical investigation on thermoelectric coolers for comparing air-to-water to air-to-air refrigerators. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144(3), 855-868.
- Tuncer, A. D., Sözen, A., Khanlari, A., Gürbüz, E. Y., Variyenli, H. İ. (2021). Upgrading the performance of a new shell and helically coiled heat exchanger by using longitudinal fins. *Applied Thermal Engineering*, 191, 116876.