

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## Üç Kademeli Soğurmalı Soğutma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi

Kenan SAKA\*

*Bursa Uludağ Üniversitesi Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksek Okulu, 16900 Yenişehir, Bursa  
(ORCID: 0000-0002-2296-894X)*

---

### Öz

Soğurmalı soğutma sistemleri atık ısı kullanarak soğutma yapmanın en etkili yollarından birini sunmaktadırlar. Yapısal açıdan soğurmalı soğutma sistemleri tek, çift ve üç kademeli olarak tasarlanırlar. Üç kademeli soğurmalı soğutma sistemleri çift ve tek kademeli soğurmalı soğutma sistemlerinden daha verimlidirler. Fakat bu sistemler daha fazla sistem elemanına sahip ve termodinamik açıdan daha karmaşıktırlar. Bu çalışmada üç kademeli bir soğurmalı soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. İncelenen sistem seri akışlı ve lityum bromür – su çözeltisiyle çalışmaktadır. Ek olarak üç farklı ısı değiştiricisi yardımıyla sistem içerisinde ısı kazanımı sağlanmıştır. Yapılan analizde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak sistem elemanlarının ekserji yıkımları ve sistemin toplam ekserji yıkımındaki değişim gösterilmiştir. Ayrıca birinci ve ikinci kanun verimliliğinde meydana gelen değişimde artış ve azalış olarak analiz sonuçlarına eklenmiştir. Sonuç olarak düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artmasıyla sistemin toplam ekserji yıkımında azalma olmuştur. Sistemin toplam ekserji yıkımındaki azalma birinci ve ikinci kanun verimliliklerine artış olarak yansımıştır. Sistem elemanları içerisinde yüksek ve düşük basınçlı kaynatıcıya ait ekserji yıkımında azalma meydana gelirken absorbere ait ekserji yıkımında ise artma olmuştur. Isı geri kazanımı sağlayan ısı değiştiricilere ait ekserji yıkımlarında ise azalma görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Üç kademeli soğurmalı soğutma sistemi, seri akış, enerji analizi, ekserji analizi.

---

## Energy and Exergy Analysis of a Triple-Stage Absorption Refrigeration System

---

### Abstract

Absorption refrigeration systems offer one of the most effective ways of cooling by using waste heat. Absorption refrigeration systems are designed as single, double and triple stage structurally. Triple stage absorption refrigeration systems are more efficient than double and single stage absorption refrigeration systems. But also the systems have more system components and they are more complex in terms of thermodynamics. In this study, energy and exergy analyses are performed on a triple stage absorption refrigeration system. The system is series flow and it works with lithium bromide – water solution. In addition, three different heat exchangers are used to achieve heat recovery within the system. In the analysis performed exergy destruction of the components and changes of total exergy destruction of the system are shown due to the low pressure generator temperature. It is also been added to the analysis results in the change in efficiency of the first and second laws as increasing and decreasing. As a result, there is decreasing in the total exergy destruction of the system with increasing of the low pressure generator temperature. The decreasing in the total exergy destruction of the system is reflected to the first and second laws efficiency as increasing. Within the system components, there is decreasing in the exergy destruction of the high and low pressure generator and there is increasing in the exergy destruction of the absorber. The decreasing in exergy destruction of heat exchangers providing heat recovery is observed.

**Keywords:** Triple stage absorption refrigeration system, series flow, energy analysis, exergy analysis.

---

---

\*Sorumlu yazar: [kenansaka@uludag.edu.tr](mailto:kenansaka@uludag.edu.tr)  
Geliş Tarihi: 06.03.2019, Kabul Tarihi: 11.07.2019

## 1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları çevreyi koruma bilincinin yaygınlaşmasına bağlı olarak her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Fosil yakıtlarının kullanımına bağlı olarak artan karbon salınımı ve buna bağlı olarak yaşanan küresel ısınma ve iklim değişikliğinin en aza indirilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları çözüm odağında yer alırlar. Başta güneş enerjisi olmak üzere rüzgâr, biyogaz ve jeotermal kaynaklı güç santrallerinin kurulu gücü her geçen gün artmaktadır. Çevre dostu akışkanlarla çalışan soğurmalı soğutma sistemleri ise yenilenebilir enerji kaynakları ve endüstriyel atık ısı kullanarak soğutma uygulamasına fırsat sunmaktadırlar.

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisini kullanan soğurmalı bir sistem Pastakkaya vd. [1] tarafından deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen sistem 40 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip güneş kolektörleri tarafından ısıtılan suyla desteklenmiştir. 30 m<sup>2</sup> taban alanına sahip bir konfor odasının ısıtma ve soğutma yükünü karşılamak amacıyla 2010 yılında yaptıkları deneylerde lityum klorür – su çözeltisi kullanan ve 20 kW soğutma kapasitesine sahip bir sistemin soğutma tesir katsayısı (STK) değerini 0,283 olarak hesaplamışlardır. Kurtulmuş ve Horuz [2] ise endüstriyel bir fırının 270 °C de çıkan baca gazından gelen atık ısıyla çalışan ve 90 kW soğutma kapasitesine sahip tek kademeli ve ısı geri kazanımı sağlayan bir ısı değiştiricisine sahip bir sistem üzerinde çalışmışlardır. İnceledikleri sistemin STK değerini 0,64 olarak hesaplayan araştırmacılar sistemdeki en büyük ekserji yıkımının 37,19 kW değerle kaynaticıda meydana geldiğini elde etmişlerdir. Ayrıca sisteme ait ekserji verimini 0,082 olarak hesaplanmıştır. Yılmaz vd. [3] ise çift kademeli bir sisteme ait yüksek basınçlı yoğunlaştırıcı üzerine odaklanmıştır. Yaptıkları analizde yüksek basınçlı yoğunlaştırıcı ve düşük basınçlı kaynaticı arasındaki termal ilişkide yüksek basınçlı yoğunlaştırıcı düşük basınçlı kaynaticıdan daha yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır. Yüksek basınçlı yoğunlaştırıcıdan düşük basınçlı kaynaticıya olan ısı transferinin sistem performansına olan etkisi araştırmacılar tarafından açıklanmıştır. Endüstriyel atık ısı kaynakları farklı türlerde ortaya çıkabildikleri için Kaynaklı vd. [4] çift kademeli bir sistemin sıcak su, su buharı ve sıcak hava ile desteklenmesi durumunda gerekli debi ve ekserji yıkımlarını hesaplamıştır. Sisteme ait STK değerini 1,23 olarak hesapladıkları analizlerinde sistem elemanları içinde en fazla ekserji yıkımının absorberde olduğunu göstermişlerdir. Yüksek basınçlı kaynaticının sıcak havayla desteklenmesi durumunda ise sıcak su ve su buharına göre daha fazla ekserji yıkımı olduğunu çalışma sonucuna eklemiştir. Soğurmalı soğutma sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan çözelti lityum bromür – su çözeltisidir. Bu çözeltiyle çalışan sistemlerin termodinamik analizleri üzerine yoğunlaşan çalışmalar literatürde yerini almıştır. Arora ve Kaushik [5] kaynaticı sıcaklığına bağlı olarak tek ve çift kademeli iki ayrı sisteme ait enerji ve ekserji verimliliğindeki değişimi göstermiştir. Çalışmada belirtilen şartlar altında tek kademeli sisteme ait performans katsayısını 0,7609 ve çift kademeli sisteme ait performans katsayısını 1,26 olarak hesaplamışlardır. Kaynaticı sıcaklığına bağlı analiz sonuçları verdikleri çalışmalarında sistemlerin daha yüksek kaynaticı sıcaklıklarında soğutma performanslarında yükselme olduğunu göstermişlerdir. Gomri [6] ise çalışmasında benzer şekilde kaynaticı sıcaklığına bağlı olarak tek ve çift kademeli sistemlerin birinci ve ikinci kanun verimliliklerinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Bu çalışmaya göre tek kademeli sistemde 75 °C ve çift kademeli sistemde 120 °C kaynaticı sıcaklıklarında sistemler en yüksek ekserji verimine sahiptirler. Ayrıca yazar diğer bir arkadaşıyla çift kademeli seri akışlı bir sistemde düşük basınçlı kaynaticıda sıcaklık artışının sistem performansındaki iyileştirici etkisini göstermiştir. Bu çalışmaya göre diğer sabit çalışma şartları altında yüksek basınçlı kaynaticının sıcaklığının artmasının sistem performansı üzerinde olumsuz etkisi vardır [7]. Üç kademeli sistemler üzerinde de çalışan yazar seri akışlı bir sistemin soğutma tesir katsayısının tek ve çift kademeli sistemlere göre daha iyi olduğu bildirmiştir [8]. Yazar tarafından incelenen seri akışlı üç kademeli sistemin STK değeri 10 °C buharlaştırıcı sıcaklığında 1,9 değerine yaklaşmıştır. Gebresslassie vd. [9] soğurmalı soğutma sistemlerine ait yedi farklı konfigürasyonun termodinamik karşılaştırmasını yaptıkları analizde en yüksek soğutma tesir katsayısının ve ekserji veriminin üç kademeli sistemlere ait olduğu sonucuna varmışlardır. Yarım, tek ve çift kademeli sistemleri inceledikleri çalışmalarında çift kademeli sisteme ait üç farklı, üç kademeli sisteme ait iki farklı konfigürasyonu çalışmalarına dâhil etmişlerdir. Maryami ve Dehghan [10] ise beş farklı konfigürasyonun karşılaştırmasına yer verdikleri çalışmalarında en yüksek verim yine üç kademeli sisteme aittir. Soğurmalı soğutma sistemlerine olan ilgi ve bu konudaki bilimsel çalışmalar artarak devam etmektedir [11-12]. Buraya kadar olan literatür sonuçları göz önüne alındığında tek ve çift kademeli sistemlere göre daha yüksek verimliliğe sahip olan ve atık ısıyla



Soğurmalı soğutma sistemlerini teorik açıdan incelerken karmaşıklığı ortadan kaldırmak üzere literatürde bazı kabuller geliştirilmiştir [13]. Tek ve çift kademeli sistemlerde olduğu gibi bu çalışmada incelenen üç kademeli sisteminde öncelikle kararlı halde çalıştığı, sistemden belirtilen şartlar dışında çevreyle herhangi bir ısı alış verişinin olmadığı ve sistem içerisinde kısımla vanaları haricinde herhangi bir basınç düşüşünün meydana gelmediği yapılan başlıca kabullerdir. Bunların yanı sıra sistemin tasarımına özgü olarak yapılan kabullerde vardır. Bu çalışmada incelenen sistem enerji kaynağı olarak atık su buharıyla desteklenmekte ve buharlaştırıcı tarafından soğuk su üretilmektedir. Ayrıca absorber ve yoğuşturucu su soğutmalı ısı atım sistemine sahiptirler. Buharlaştırıcı 100 kW sabit kapasitede soğutma yapmaktadır. Sistemde yer alan elemanlara ait çalışma şartları ise analiz sonucunu gösteren şekiller üzerinde verilmiştir.

### 3. Termodinamik Analiz

Soğurmalı soğutma sistemlerinin termodinamik analizlerinde kullanılan simülasyonlar her bir sistem elemanın kütle ve enerji korunumunu ifade eden denklemlerden oluşan bir matematiksel modeldir. Aşağıdaki genel denklemlerin bilgisayar ortamında her bir sistem elemanı için tanımlanmasıyla bütün sistem elemanlarının kapasite değerleri ve ekserji yıkımları hesaplatılmıştır. Oluşturulan matematiksel modelde bulunan onlarca denklemin çözdürülmesi için yazılım dili olarak Delphi tercih edilmiştir. Aşağıda verilen genel denklemlerde fakir çözelti, f; zengin çözelti ise z kısaltmasıyla gösterilmiştir. Ayrıca debi, m; entalpi, h; konsantrasyon, X; sıcaklık, T ve son olarak entropi ise s ile ifade edilmiştir.

$$\dot{m}_f = \dot{m}_z + \dot{m}_{H_2O} \quad (1)$$

$$\dot{m}_f X_f = \dot{m}_z X_z \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (3)$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (4)$$

Sisteme ait soğutma tesir katsayısı (STK) olan birinci kanun verimliliği ifade eden Denklem (5) aşağıda verilmiştir. Buharlaştırıcı kapasitesinin yüksek basınçlı kaynatıcı ve çözelti pompası kapasitelerine bölünmesiyle sisteme ait enerji verimliliği hesaplatılmıştır. Sistemde yer alan çözelti pompasına ait kapasitenin diğer sistem elemanlarına göre çok az olması nedeniyle literatürde bazı çalışmalarda ihmal edilmektedir. Buharlaştırıcı ve yüksek basınçlı kaynatıcı sıcaklıkları kapasiteleri ile ilişkilendirilerek ikinci kanun verimliliği olan ekserjitik soğutma tesir katsayısını (ESTK) ifade eden Denklem (6) elde edilmiştir. Ayrıca su ve sistemde kullanılan çözeltinin termodinamik özelliklerini tanımlayan denklemler literatürden alınmıştır [14-15]. Aşağıda verilen genel denklemlerde buharlaştırıcı, B; yüksek basınçlı kaynatıcı, YBK ve pompa ise p kısaltmasıyla gösterilmiştir.

$$STK = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{YBK} + \dot{W}_P} \quad (5)$$

$$ESTK = \frac{-\dot{Q}_B (1 - T_0/T_B)}{\dot{Q}_{YBK} (1 - T_0/T_{YBK}) + \dot{W}_P} \quad (6)$$

Hazırlanan matematiksel modele ısı değiştiricileri de dâhil edilmiştir. Isı değiştiricileri fakir eriyiğin daha yüksek entalpide yüksek basınçlı kaynatıcıya girmesini sağladığından yüksek basınçlı kaynatıcı tarafından çekilen ısı yükünü azaltırlar. Bu durum performans artışı olarak sonuçlara yansırken ısıveren çözelti için kristalizasyon sorunu yaşanabilir. Bu durum yapılan bütün analizlerde ısı değiştiricisi çıkışlarında kristalizasyon sıcaklığı hesaplatılarak denetlenmiştir. Ayrıca sistemde noktasal olarak basınç değerleri de hesaplatılmıştır.

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Üç kademeli soğurmalı soğutma sisteminin termodinamik açıdan davranışlarının belirlenmesi amacıyla hazırlanan matematiksel modelin bilgisayar ortamında çalıştırılması yapılan analizler için imkân sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarla uyumluluk göstermiştir. Tablo 1’de Gomri’nin [16] 300 kW sabit soğutma yapan bir sistemi incelediği çalışmasında elde ettiği sonuçlarla bir karşılaştırma yapılmıştır. Yazar sistemde ısı geri kazanımı sağlayan ısı değiştiricisi etkenliklerini 0,85 olarak seçtiği için STK sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Bu çalışmanın genelinde ısı değiştiricisi etkenlikleri 0,7 olarak seçilmiştir. Tablo 1’de verilen diğer çalışma şartlarına bağlı olarak %50, %70 ve % 85 ısı değiştiricisi etkenliğine bağlı olarak elde edilen kapasite değerlerindeki değişim ve ısı değiştiricisi kullanımının enerji verimliliği açısından önemi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması beklenen bir yaklaşım olmasına rağmen üç kademeli soğurmalı soğutma sistemleri için bu yaklaşım mümkün olmamaktadır. Tek kademeli soğurmalı soğutma sistemlerinin keşfi ve yaygınlaşması çok uzun zaman önce başlasa bile üç kademeli sistemlerin üretimine başlanması henüz yenidir. Bu tür sistemlerin henüz daha yeni olması bu çalışmanın yapılmasının nedenlerinden biri olmakla birlikte bu çalışmada incelenen sistemle aynı özelliklere sahip bir ürüne ait bilgilere literatürde karşılaşılmadığından deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılamamaktadır.

**Tablo 1.** Sistem bileşenlerinin kapasiteleri ve literatürle karşılaştırma

$T_{YBK} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{OBK} = 134,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{DBK} = 81 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_B = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_A = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_Y = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Sistem Bileşeni	Kapasite (kW) Mevcut çalışma $\varepsilon_{I,II,III} = 0,50$	Kapasite (kW) Mevcut çalışma $\varepsilon_{I,II,III} = 0,70$	Kapasite (kW) Mevcut çalışma $\varepsilon_{I,II,III} = 0,85$	Kapasite (kW) Mevcut çalışma $\varepsilon_{I,II,III} = 0,85$	Kapasite (kW) Gomri [16] $\varepsilon_{I,II,III} = 0,85$
Yüksek Basıncılı K.	228,13	191,42	170,40	170,40	169,68
Yoğuşturucu	142,44	123,23	115,33	115,33	112,23
Buharlaştırıcı	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Absorber	386,21	368,60	355,40	355,40	357,67
Çözelti Pompası	0,243	0,237	0,234	0,234	0,220
STK	1,314	1,565	1,758	1,758	1,766

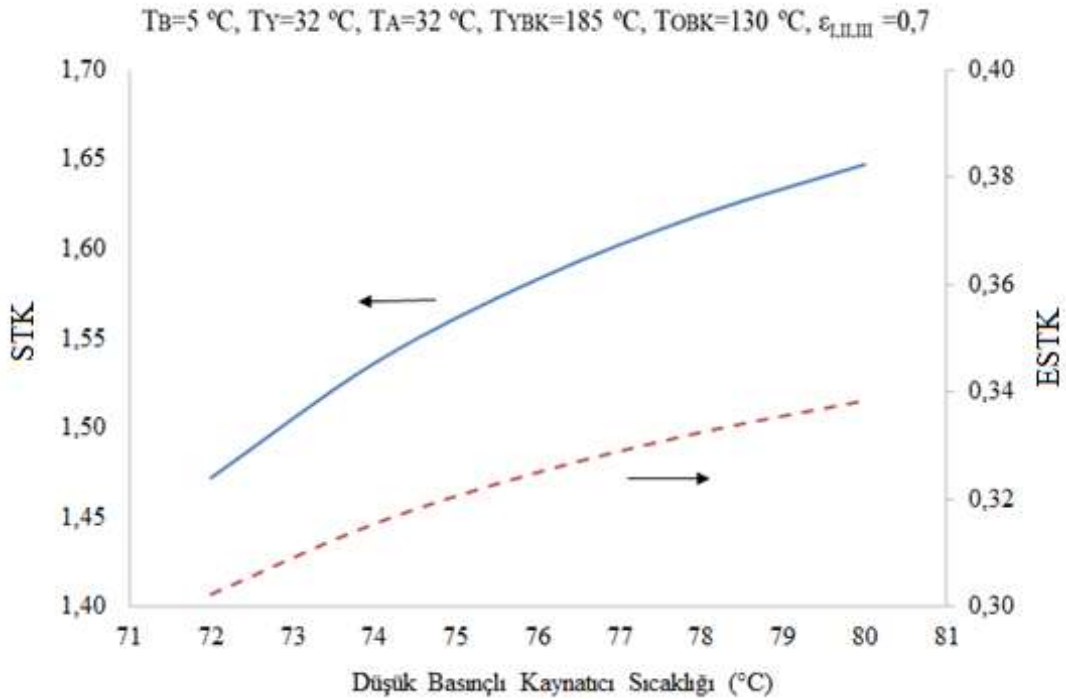
Tablo 1’de verilen sistemde yer alan elemanların kapasiteleri incelendiğinde öncelikle absorberin sahip olduğu yüksek kapasite dikkati çekmektedir. Yoğuşturucu ve absorber her ikisi de ısı atan eleman olmalarına rağmen absorberin kapasitesinin yoğuşturucu kapasitesinin iki katından fazla olması sistem elemanlarının boyutlandırılmasında ve sistemin ısı atım kısmının tasarımında üreticilere ışık tutmaktadır. Ayrıca pompanın kapasitesi diğer sistem elemanlarıyla karşılaştırıldığında son derece azdır. Bu durum enerji verimliliği açısından avantaj gibi görünse de üretim aşamasında bu kadar küçük bir pompanın sistem ile uyumlu çalışması üzerinde durulması gereken bir konudur. Sistemde ısı geri kazanımı için kullanılan ısı değiştiricilerin etkenliğinin artması sistem verimliliğini ciddi oranda etkilemektedir. Görüldüğü gibi sabit soğutma kapasitesine bağlı olarak ısı değiştiricisi etkenliklerinin artması yüksek basınçlı kaynatıcı kapasitesini azaltmakta ve bu durum daha yüksek STK olarak kendini göstermektedir.

Tablo 2’de sisteme ait verilen çalışma şartları altında sistem elemanlarının ısı kapasiteleri ve ısı kapasitelerine bağlı olarak meydana gelen ekserji yıkım değerleri gösterilmiştir. Sistemde yer alan üç farklı ısı değiştiricisine ait 0,7 etkenlik ve diğer çalışma şartları altında sisteme ait STK değeri 1,647 olarak hesaplanmıştır. Tabloya göre sistemde en yüksek ısı yük 120,552 kW kapasiteyle absorbere aittir. Absorberi buharlaştırıcı ve yüksek basınçlı kaynatıcı takip etmektedir. Benzer sıralama ekserji yıkım değerlerinde de geçerlidir. En fazla yıkım 5,915 kW ile absorberde sonra buharlaştırıcıda sonrada yüksek basınçlı kaynatıcıda yaşanmıştır. Absorberdeki ekserji yıkımı tüm sistemdeki yıkımın % 32’sini oluşturmaktadır. Buharlaştırıcı % 19,3 ve yüksek basınçlı kaynatıcı sistemdeki ekserji yıkımının % 9,9 oranına sahiptirler. Sistemin toplam ekserji kaybı 18,460 kW olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Sistem elemanlarının kapasiteleri ve ekserji yıkım değerleri

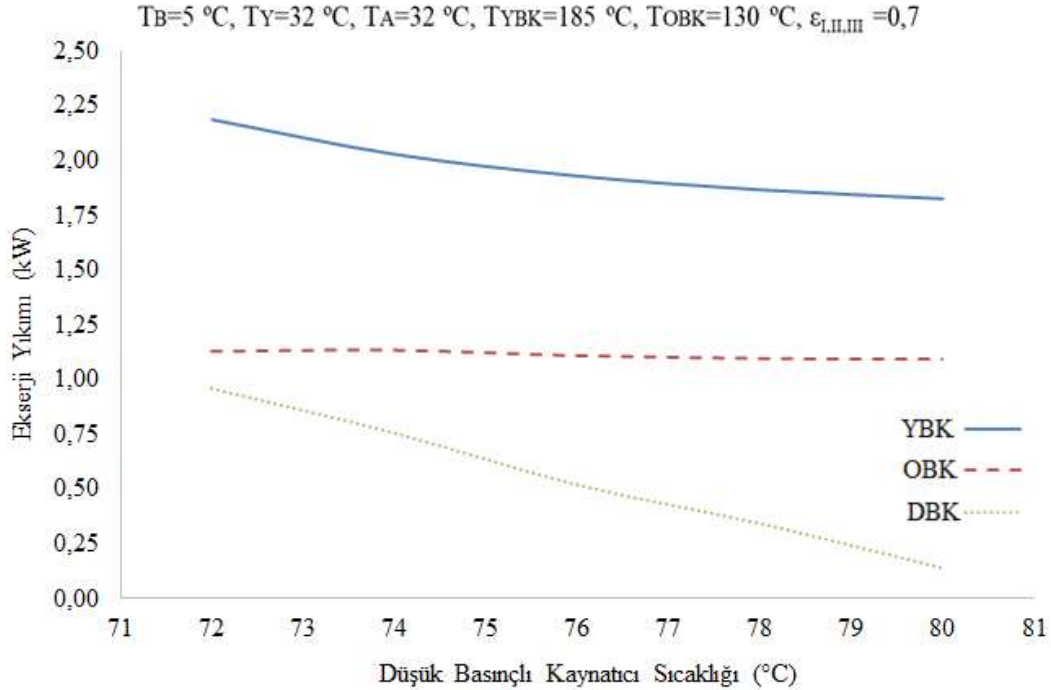
$T_{YBK}=185\text{ °C}$	$T_{OBK}=130\text{ °C}$	$T_{DBK}=80\text{ °C}$	$T_B=5\text{ °C}$	$T_A=32\text{ °C}$	$T_Y=32\text{ °C}$	$\varepsilon_{I,II,III}=0.7$
Sistem Bileşeni	Isıl Kapasite (kW)	Ekserji Yıkımları(kW)			Ekserji Yıkım Oranı %	
Yüksek Basıncılı Kaynatıcı	60,655	1,826			9,90	
Orta Basıncılı Kaynatıcı	37,127	1,090			5,90	
Düşük Basıncılı Kaynatıcı	32,870	0,140			0,80	
Yoğuşturucu	40,175	0,863			4,70	
Buharlaştırıcı	100,000	3,565			19,3	
Absorber	120,552	5,915			32,0	
Pompa	0,0626	0,000			0,00	
Isı Değiştiricisi I	17,058	0,769			4,20	
Isı Değiştiricisi II	27,642	1,423			7,70	
Isı Değiştiricisi III	35,414	1,528			8,30	
Kısılma Vanası I	0	0,919			5,00	
Kısılma Vanası II	0	0,190			1,00	
Kısılma Vanası III	0	0,243			1,30	
STK	1,647	Toplam = 18,469			Toplam = 100	
ESTK	-	0,339			-	

100 kW soğutma yapabilen üç kademeli bir soğurmalı soğutma sisteminde yaklaşık 18,5 kW kullanılabilirlik kaybı olmaktadır. Soğurmalı soğutma sistemlerinde yüksek basınçlı kaynatıcıları besleyen ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak literatürde yer alan bazı çalışmalarda yüksek basınçlı kaynatıcıda yaşanan ekserji yıkımları çok fazla çıkmaktadır. Bu çalışmada ısı kaynağındaki ekserji yıkımlarının sistemin ekserji yıkım değerlerini örtmesi istenmediği için yüksek basınçlı ısı kaynağı düşük basınçlı kızgın su buharı ile beslenerek ısı kaynağındaki ekserji yıkımları minimize edilmiştir. Sistemde yer alan ısı değiştiricilere ait ısıl yük ve ekserji kayıpları incelendiğinde yüksek basınçlı kaynatıcıya yakın olan ısı değiştiricilerin ısıl yük ve ekserji yıkım değerlerinde artış olduğu tablodan anlaşılmaktadır. Sistemin ekserji verimi 0,339 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2 üzerinde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak sistem verimliliğindeki değişim gösterilmiştir.

**Şekil 2.** Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı STK ve ESTK değişimi

Sistemde yer alan bütün elemanların çalışma şartlarının sistem üzerinde etkisi olmakla beraber düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak analizler yapılmıştır. Literatürde yer alan tek ve çift kademeli sistemler üzerinde kaynatıcının etkisini gösteren çalışmalar göz önüne alındığından üç kademeli soğutma sistemlerinde yer alan üç farklı kaynatıcı içerisinde düşük basınçlı kaynatıcının tek kademeli sistemlerde yer alan kaynatıcıyla benzer davranışlar gösterdiği görülmüştür. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar bu yargıyı desteklemektedir.

Şekil 2 üzerinde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak sisteme ait birinci kanun verimi ve ikinci kanun veriminde yaşanan değişimler gösterilmiştir. Şekil üzerinde verilen diğer çalışma şartlarına bağlı olarak sistemdeki düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artmasının sistem performansı üzerinde olumlu sonuçları görülmektedir. Düşük basınçlı kaynatıcının 72 °C'de çalıştırılması sonucu sisteme ait performans değeri 1,472 iken sıcaklık 80 °C çıkarıldığında STK değeri % 12'lik bir artışla 1,647 olmuştur. Benzer şekilde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artırması ekserji verimliliğinde de artışa neden olmuş ve ESTK değeri 0,302 değerinden 0,338 değerine çıkmıştır. Şekil üzerinde görüldüğü gibi eğrinin davranışı azalan artış türündendir. Sistemin diğer çalışma şartları ise düşük basınçlı kaynatıcı için sınırlayıcı etkiye sahiptir. Verilen şartlar için düşük basınçlı kaynatıcının daha yüksek sıcaklıkta çalıştırılması ısıl dengesizliğe neden olduğu için 80 °C'nin üzerine çıkılmamıştır. Düşük basınçlı kaynatıcının ısıl sınırlar içerisinde daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmasının sistem performansı üzerindeki olumlu etkilerinden yukarıda bahsedilmiştir. Bir soğutma sisteminin daha verimli hale getirilmesi sistemde yaşanan ekserji yıkımlarını ya da diğer bir ifadeyle kullanılabilirlikte yaşanan azalmaları daha aza indireceği ön görülebilir. Fakat üç kademeli bir soğutma sistemi gibi birçok sistem elemanına sahip bir çevrim için sistem elemanlarında yaşanan ekserji yıkımlarındaki değişimin ayrıntılı olarak ifade edilmesi ancak bir analizle mümkündür. Sistem elemanlarının ekserji yıkımlarındaki değişimin bulunması bu çalışmanın kapsamına dâhil edilmiş ve aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

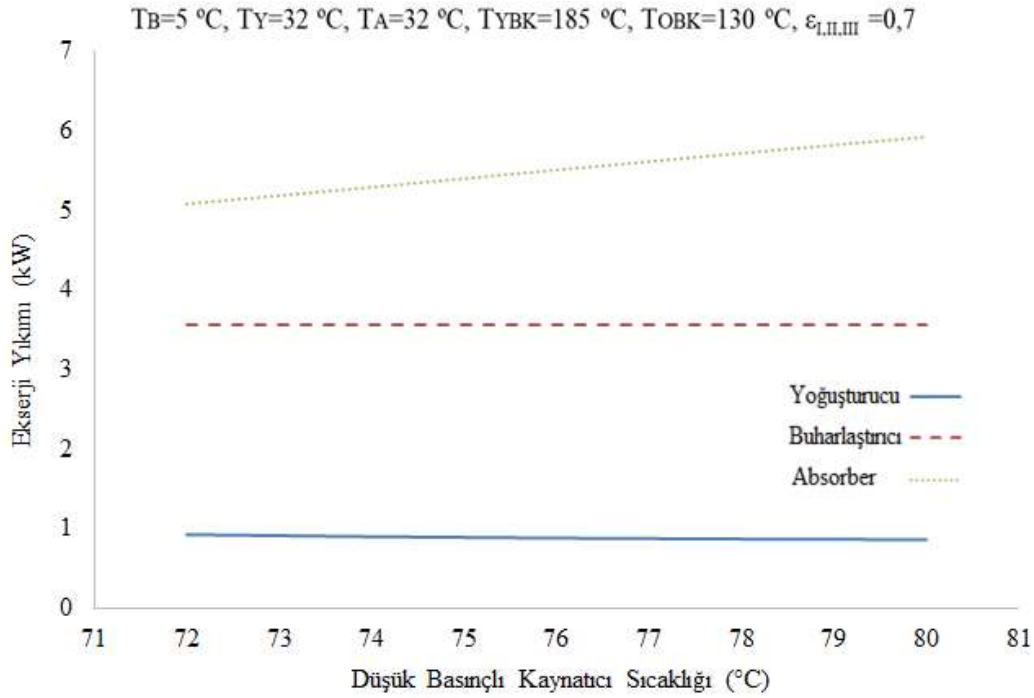


Şekil 3. Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak kaynatıcılara ait ekserji yıkımındaki değişim

Üç kademeli soğutma sistemleri çalışma prensibine has olarak üç farklı basınç değerinde çalışan üç farklı kaynatıcıya sahiptirler. Bunlar yüksek basınçlı kaynatıcı, orta basınçlı kaynatıcı ve düşük basınçlı kaynatıcılardır. Şekil 3 üzerinde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak üç farklı kaynatıcıya ait ekserji yıkımındaki değişim gösterilmiştir. Şekil üzerinde gösterildiği gibi orta basınçlı kaynatıcıya ait ekserji yıkımı düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığından çok fazla etkilenmemektedir ve sadece %3 oranında bir azalma olmuştur. Bu durum orta basınçlı kaynatıcının sistem üzerinde

bulunduğu konum ile açıklanabilir. Ekserji yıkımdaki azalmanın en fazla olduğu kaynatıcı ise düşük basınçlı kaynatıcıdır. Kaynatıcının çalışma sıcaklığının 8 °C artırılması başlangıçta 0,96 kW olan ekserji yıkımını %85 oranında bir azalışla 0,14 kW değerine indirmiştir. Benzer şekilde yüksek basınçlı kaynatıcıya ait ekserji yıkımında % 17 oranında bir azalma olmuştur.

Üç kademeli bir soğurmalı soğutma sisteminin diğer konfigürasyon türleriyle ortak olarak değerlendirilebilecek olan sistem elemanları yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve absorberdir. Şekil 4 üzerinde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve absorberde yaşanan ekserji yıkımındaki değişim gösterilmiştir. Şekil üzerinde görüldüğü gibi üç ayrı sistem elemanı içinde en fazla ekserji yıkımı absorberdedir. Bu durum daha önce kapasite değerlerinin verildiği bölümle ilişkilendirildiğinde absorberin sistem içerisinde en fazla kapasiteye sahip eleman olmasıyla açıklanabilir. Absorberden sonra sırasıyla buharlaştırıcıda ve yoğuşturucuda ekserji yıkımları en fazla olmaktadır. Şekil 4 üzerinde görüldüğü gibi buharlaştırıcıya ait ekserji yıkımında düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı herhangi bir değişim olmamaktadır. Şekil üzerinde verilen çalışma şartları altında 3,565 kW olarak hesaplanan ekserji yıkımının değişmemesi analizlerde buharlaştırıcı kapasitesinin sabitlenmesiyle açıklanabilir. Fakat şekil üzerinde dikkati çeken nokta yoğuşturucuya ait ekserji yıkımının etkilenmemesidir. Başlangıçta 0,926 kW olan ekserji yıkımı 0,863 kW değeri gerilemiştir. Bu değişim şekil üzerinde fark edilemeyecek kadar azdır.

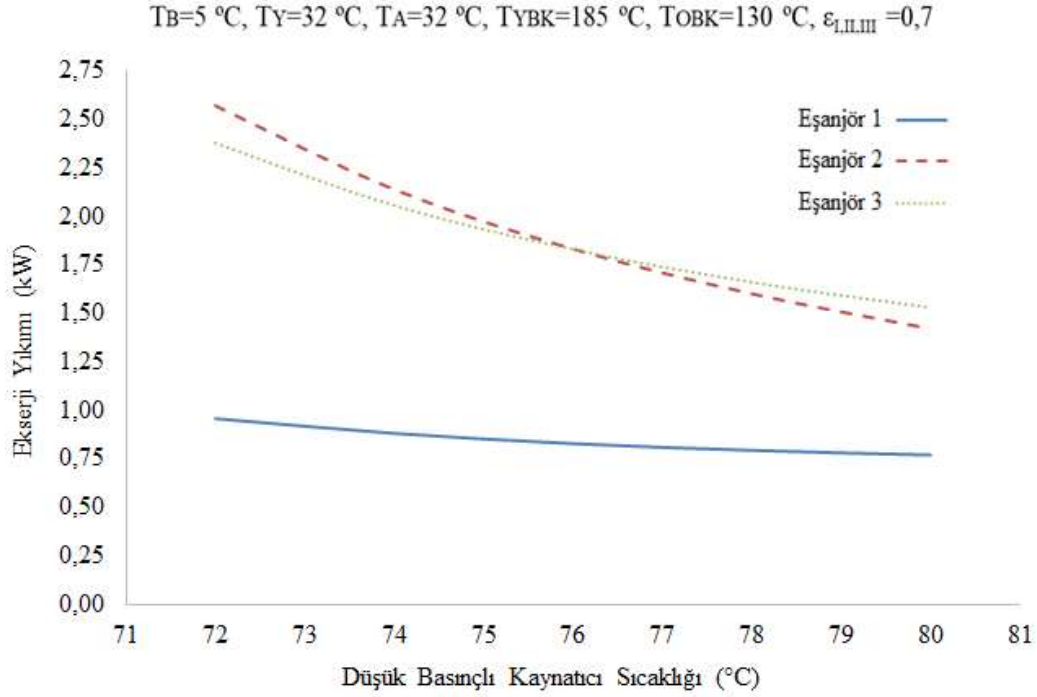


**Şekil 4.** Yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve absorbere ait ekserji yıkımındaki değişim

Şekil 4 üzerinde dikkati çeken diğer bir nokta absorberdeki ekserji yıkımının artmasıdır. Absorber bu yönüyle sistemde bir istisna teşkil etmektedir. Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artmasıyla sisteme ait verim seviyesinin artması ve sistem elemanlarına ait ekserji yıkım değerlerinde genel olarak bir azalma olurken sadece absorberde artış olmuştur. Başlangıçta 5,069 kW olan ekserji yıkımı 5,915 kW seviyesine yükselmiştir. Bu değişim % 17 oranında bir artışa tekabül etmektedir.

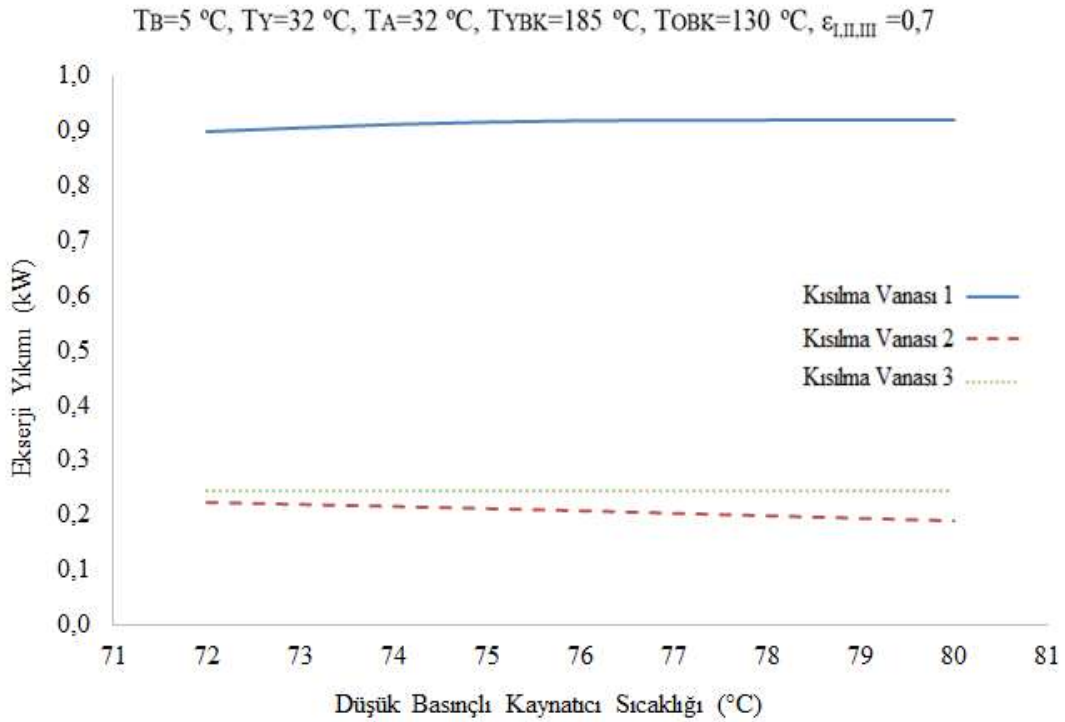
Bu çalışma kapsamında incelenen sistemde ısı geri kazanımı sağlaması ve dolayısıyla sistemin enerji performansını artırmak amacıyla üç farklı ısı değiştiricisi kullanıldığından daha önce bahsedilmişti. Şekil 5 üzerinde ısı değiştiricilerine ait ekserji yıkımındaki değişim düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak gösterilmiştir.





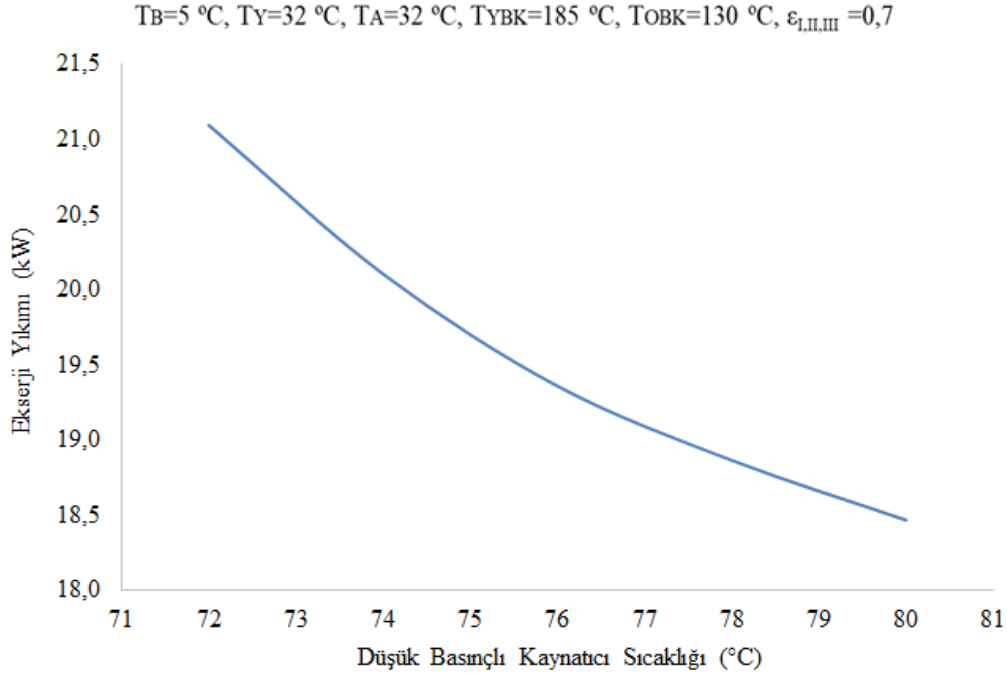
**Şekil 5.** Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı olarak ısı değiştiricilerine ait ekserji yıkımındaki değişim

Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artmasıyla ısı değiştiricilerindeki ekserji yıkım miktarları da azalmaktadır. Buna göre bir numaralı ısı değiştiricisine ait ekserji yıkımı %19,64 oranında düşerek 0,188 kW azalmıştır. İki numaralı ısı değiştiricisi ise 2,568 kW değerinden 1,423 kW değerine düşmüştür. Bu durum % 45 oranında bir azalma demektir. Benzer şekilde üç numaralı ısı değiştiricisine ait ekserji yıkımında eğri sonunda %35,7 oranında bir azalma olmuştur. Eğrilerin son halinde ısı değiştiricilerine ait ekserji yıkım miktarı sıralaması da değişmiştir.



**Şekil 6.** Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı kısılma vanalarındaki ekserji yıkımındaki değişim

Şekil 6 üzerinde sistemdeki kısılma vanalarında meydana gelen ekserji yıkımındaki değişim gösterilmiştir. Buna göre en fazla ekserji yıkımı bir numaralı kısılma vanasında meydana gelmiştir. Daha sonra sırasıyla üç numaralı ve iki numaralı kısılma vanalarında ekserji yıkımı olmuştur. Üç numaralı kısılma vanası düşük basınçlı kaynatıcının çalışma sıcaklığından etkilenmemektedir. Bir numaralı kısılma vanasında grafik boyunca azda olsa yani % 2,3 oranında bir artış olmuş iki numaralı kısılma vanasında ise % 14,8 oranında bir azalma olmuştur.



Şekil 7. Düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı sistemdeki toplam ekserji yıkımındaki değişim

Şekil 7 üzerinde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkımının değişimi verilmiştir. Başlangıçta 21,095 kW olan ekserji yıkımı düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının artmasıyla azalmış ve 18,469 kW değerine gerilemiştir. Bu durum grafik boyunca %12,5 oranında bir azalma anlamına gelmektedir. Buraya kadar verilen analiz sonuçları göz önüne alındığında her bir sistem elemanının ekserji yıkımındaki azalmaya katkısının farklı olduğu görülür. Bunun sebebi sistem elemanlarının ısıl kapasitelerinin ve sistemdeki konumlarının farklı olmasıyla açıklanabilir. Çalışmada incelenen on iki farklı sistem elemanında yüksek basınçlı kaynatıcı ve düşük basınçlı kaynatıcıya ait ekserji yıkımlarında belirgin bir azalma olmuştur. Ayrıca bir ve iki numaralı ısı değiştiricilerindeki ekserji yıkım miktarı belirgin bir şekilde azalmaktadır. Ekserji yıkımının belirgin bir şekilde arttığı tek eleman absorberdir. Geriye kalan sistem elemanlarındaki değişim ya sabit yada çok az olarak gerçekleşmiştir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada üç kademeli seri akışlı lityum bromür – su çözeltisiyle çalışan bir soğurmalı soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizine yer verilmiştir. Öncelikle literatür sonuçlarında üç kademeli sistemlerin tek ve çift kademeli sistemlere göre daha yüksek verimliliğe sahip olduğu ve atık ısıyla soğutma imkânı sunan bu sistemlerin bilimsel açıdan halen incelenmeye değer olduğu görülmüştür. Çalışma sıcaklığının sistem verimliliği üzerinde etkileyici bir yönü olan düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığına bağlı analizler yapılmıştır. Sistem içerisinde geçerli olan ısıl denge gereği diğer çalışma şartlarına bağlı olarak düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığı en fazla 80 °C'ye kadar çıkartılmıştır. Tablo halinde verilen sonuçlarda sistemde ısı geri kazanım amacıyla kullanılan üç farklı ısı değiştiricisi etkinliğinin sistem performansı üzerindeki olumlu etkileri gösterilmiştir. Sistem elemanları içinde en fazla ısı yük absorbere aittir. Çalışmada verilen şartlar altında STK değeri 1,647 olarak hesaplanmıştır.

Ekserji yıkım oranları kıyaslandığında ise % 32 oranla en fazla ekserji yıkımı absorberde

meydana gelmiştir. Absorberi buharlaştırıcı ve yüksek basınçlı kaynatıcı takip etmektedir. 100 kW sabit soğutma yüküne sahip olan sistemde toplam ekserji yıkımı 18,5 kW olarak hesaplanmıştır. Sisteme ait ESTK değeri ise 0,339 olarak bulunmuştur. Sisteme ait yapılan diğer analizlerde düşük basınçlı kaynatıcı sıcaklığının 72 °C'den 80 °C'ye kadar artmasıyla sisteme ait STK ve ESTK değerlerinde % 12 oranında bir iyileşme görülmüştür. Sistem üzerinde meydana gelen genel performans iyileşmesinin sistem elemanları üzerindeki etkileri farklı olmuştur. Yüksek basınçlı kaynatıcı ve düşük basınçlı kaynatıcıya ait ekserji yıkımlarında belirgin bir şekilde azalma olurken orta basınçlı kaynatıcıda sadece % 3 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Buharlaştırıcıda sabit, yoğunlaştırıcıda % 6,8 azalma fakat absorberde % 16,7 oranında bir artış olmuştur. Her üç ısı değiştiricisine ait ekserji yıkımında azalma olurken bu oran bir numaralı ısı değiştiricisinde % 19,6 ve iki numaralı ısı değiştiricisinde %44,6 olmuştur. Üç numaralı ısı değiştiricisine ait oran ise % 35,7'dir. Kısılma vanaları içinde en fazla % 14,8 oranla iki numaralı kısılma vanasına ait ekserji yıkımında azalma yaşanmıştır. Sistem elemanlarına ait ekserji yıkım miktarlarının toplanmasıyla elde edilen sisteme ait ekserji yıkım oranındaki toplam azalma ise %12,5 olarak gerçekleşmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Pastakkaya B., Yamankaradeniz N., Kaynaklı Ö., Coskun S., Yamankaradeniz R. 2012. Experimental analysis of a solar absorption system with interior energy storage. *Journal of Energy in Southern Africa*, 23 (2): 39-49.
- [2] Kurtulmuş N., Horuz İ. 2017. An Industrial vapor absorption air conditioning application. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36 (2) :49-60.
- [3] Yılmaz İ.H., Saka K., Kaynaklı O. 2016. A thermodynamic evaluation on high pressure condenser of double effect absorption refrigeration system. *Energy*, 113: 1031-1041.
- [4] Kaynaklı O., Saka K., Kaynaklı F. 2015. Energy and Exergy Analysis of a Double Effect Absorption Refrigeration System Based on Different Heat Sources. *Energy Conversion and Management*, 106: 21-30.
- [5] Arora A., Kaushik S.C. 2009. Theoretical analysis of LiBr/H<sub>2</sub>O absorption refrigeration systems. *International Journal of Energy Research*, 33: 1321-1340.
- [6] Gomri R. 2008. Thermodynamic evaluation of triple effect absorption chiller. *Thermal Issues in Emerging Technologies, ThETA 2, Cairo, Egypt*.
- [7] Gomri R., Hakimi R. 2008. Second law analysis of double effect vapor absorption cooler system. *Energy Conversion and Management*, 49: 3343-3348.
- [8] Gomri R. 2010. Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 51: 1629-1636.
- [9] Gebressie B.H., Medrano M., Boer D. 2010. Exergy analysis of multi-effect water-LiBr absorption systems: From half to triple effect. *Renewable Energy*, 35: 1773-1782.
- [10] Maryami R., Dehghan A.A. 2017. An exergy based comparative study between LiBr/water absorption refrigeration systems from half effect to triple effect. *Applied Thermal Engineering*, 124: 103-123.
- [11] Yılmaz İ.H., Saka K., Kaynaklı Ö., Kaşka Ö. 2019. Performance Assessment and Solution Procedure for Series Flow Double-Effect Absorption Refrigeration Systems Under Critical Operating Constraints. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44: 5997-6011.
- [12] Saka K., Yılmaz İ.H., Göksu T.T. 2018. Üç-kademeli Bir Soğurmalı Soğutma Siteminde Kaynatıcılara Bağlı Enerji ve Ekserji Analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 4 (1): 67-76.
- [13] Kaynaklı O., Kılıç M. 2007. Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 48: 599-607.
- [14] Chua H.T., Toh H.K., Malek A., Ng K.C., Srinivasan K. 2000. Improved thermodynamic property field of LiBr-H<sub>2</sub>O solution. *International Journal of Refrigeration*, 23: 412-429.
- [15] Mostafavi M., Agnew B. 1996. The impact of ambient temperature on lithium bromide-water absorption machine performance. *Applied Thermal Engineering*, 16: 515-522.
- [16] Gomri R. 2009. Second law comparison of single effect and double effect vapor absorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 50: 1279-1287.