



H₂O-LiBr VE NH₃-H₂O ERİYİĞİ KULLANAN TEK KADEMELİ SOĞURMALI SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

(A COMPARISON BETWEEN H₂O-LiBr AND NH₃-H₂O SOLUTIONS
IN SINGLE STAGE ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEM)

Ömer KAYNAKLI*, Recep YAMANKARADENİZ*

ÖZET/ABSTRACT

Son yıllarda, NH₃-H₂O ve H₂O-LiBr eriyiği kullanan soğurmalı soğutma sistemlerinin performansının iyileştirilmesi için çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, NH₃-H₂O ve H₂O-LiBr eriyiği kullanan tek kademeli soğurmalı soğutma sistemlerinin termodinamik analizi yapılmıştır. Eriyiklere ait termodinamik özellikler verilerek sistemlerin performansı, farklı ısıtıcı, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve soğurucu sıcaklıklarında karşılaştırılmıştır. Her iki sistemin de performansı ısıtıcı ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının artışıyla artmakta ancak yoğuşturucu ve soğurucu sıcaklıklarının artışıyla azalmaktadır. Genel olarak H₂O-LiBr eriyiği kullanan sistemin performansı NH₃-H₂O eriyiği kullanan sisteme göre daha iyi olmaktadır.

In recent years, research has been devoted to improvement of the performance of NH₃-H₂O and H₂O-LiBr absorption refrigeration systems. In this study, thermodynamic analysis of NH₃-H₂O and H₂O-LiBr single stage absorption refrigeration systems are carried out. Detailed thermodynamic properties of solutions are presented and system performances are compared at various generator, condenser, evaporator and absorber temperatures. As a result, it is seen that performance of both systems increase with increasing heater and evaporator temperatures, but decrease with increasing condenser and absorber temperatures. It is observed that generally the performance of H₂O-LiBr absorption refrigeration system is better than that of the NH₃-H₂O system.

ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Soğurmalı soğutma sistemi, Su-lityum bromür eriyiği, Amonyak-su eriyiği, Performans katsayısı
Absorption refrigeration system, Water-lithium bromide solution, Ammonia-water solution, Coefficient of performance

* Uludağ Üniversitesi, Müh-Mim. Fak., Makine Müh. Böl., 16059, Görükle, BURSA

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunun artması sonucu enerji gereksinimi gittikçe büyümektedir. Buna karşılık dünyada kullanılan klasik enerji türleri rezervlerinin, gelecek bir zamanda gereksinimi karşılayamaz duruma geleceği açıktır. Buna çözüm olarak iki alternatif vardır; birincisi mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak, ikincisi yeni enerji türleri ortaya çıkarmak suretiyle kullanıma hazır hale getirmektir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için ikinci yol oldukça pahalı ve zordur. Bundan dolayı sahip olduğumuz veya satın aldığımız klasik enerji türlerini daha verimli şekilde kullanmak zorundayız. Bu nedenle, özellikle soğurmalı soğutma sistemleri, bir prosesde açığa çıkan atık ısı, güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi temini ucuz olan enerji türleri kullanılabilmesi nedeniyle son yıllarda tekrar önem kazanmıştır.

Kullanımı en yaygın soğurmalı soğutma sistemleri, $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ve $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanan sistemlerdir. Amonyakın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ eriyiği kullanan sistemler yaklaşık -10°C buharlaştırıcı sıcaklığına kadar soğutma yapabilmektedir. Suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanan sistemlerde ise soğutma, suyun donma riskinden dolayı yaklaşık 4°C dolaylarındadır.

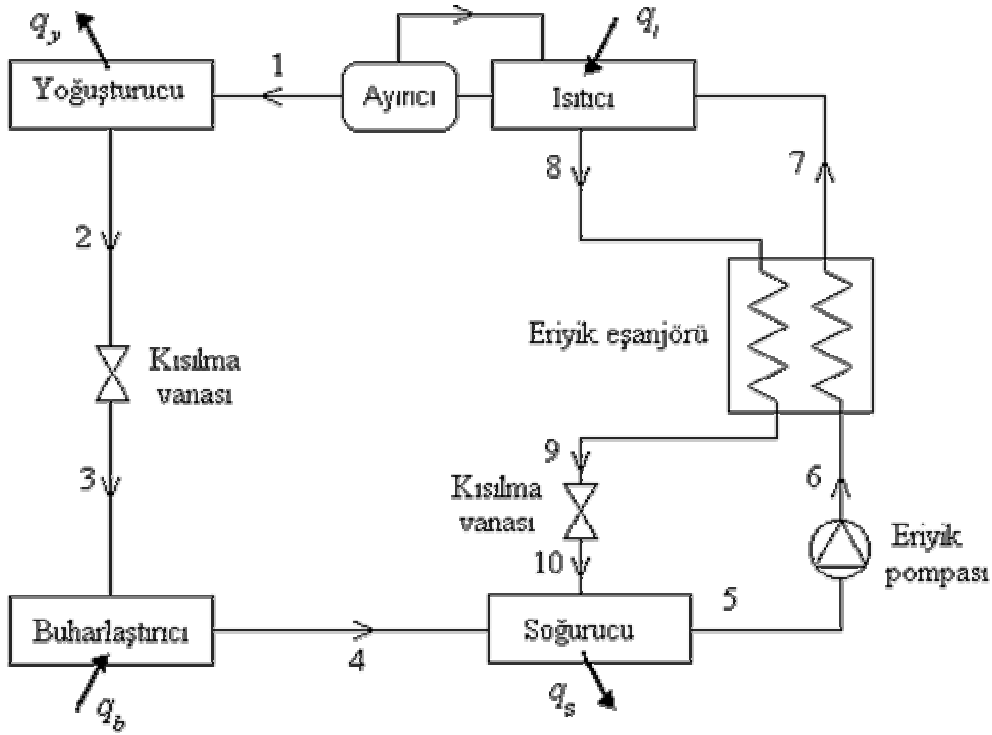
Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, Sun, $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çiftinin alternatifi olabilecek bazı eriyikler sunmuştur. Çalışmada çevrimin termodinamik analizi yapılarak amonyakın farklı soğurucu akışkanlarla karışımları neticesinde oluşturduğu eriyiklerin performansı incelenmiştir (Sun, 1998). Keçeciler vd., $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanan soğurmalı soğutma sistemin jeotermal enerji destekli kullanılabilirliğini deneysel olarak test etmiştir (Keçeciler vd., 2000). Mostafavi ve Agnew, $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanan soğurmalı soğutma makinesinin performansının çevre sıcaklığı ile değişimini incelemiştir (Mostafavi ve Agnew, 1996). Seara ve Vazquez, optimum ısıtıcı sıcaklığı (OGT) tanımlaması yaparak, $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çevrimi için sistemdeki elemanların sıcaklıklarının sistemin performansına ve OGT'ye etkisini incelemiştir (Seara ve Vazquez, 2001). Saravanan ve Maiya, suyun çeşitli soğurucu akışkanlarla oluşturduğu eriyik çiftlerinin sistem performansına etkisini incelemiştir (Saravanan ve Maiya, 1998). Seewald ve Blanco, $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiğinin bazı termodinamik özelliklerini vererek bu sistemde kullanılan soğurucunun modellenmesi üzerine çalışmıştır (Seewald ve Blanco, 1994). Chuang ve Ishida, tek kademeli soğurmalı sistemin ve çift kademelilerden seri ve paralel akışlı soğurmalı sistemlerin ekserji analizini yaparak çevrimleri karşılaştırmıştır. Bu çevrimlerde $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanılmıştır. Yapılan ekserji analizi sonucu paralel akışlı sistemin en iyi performansı verdiği belirtilmiştir (Chuang ve Ishida, 1990).

Bu çalışmada, kullanım alanı yaygın olan $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ve $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiklerinin termodinamik özellikleri verilerek çevrimlerin analizi yapılmıştır. Sistemlerin performansının, ısıtıcı, buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve soğurucu sıcaklıklarıyla değişimi incelenmiştir. Çevrimde bulunan elemanların kapasiteleri, dolaşım oranı ve pompalama gücü gibi sistemin performansını etkileyen faktörler karşılaştırılmıştır.

2. ÇEVİRİMİN ANALİZİ

Tek kademeli eriyik eşanjörlü bir soğurmalı soğutma sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Eriyik eşanjörü, ısıtıcıdan çıkan zengin eriyiğin (lityum bromürlü sistem için) veya fakir eriyiğin (amonyaklı sistem için) ısıl enerjisinden yararlanarak diğer taraftaki eriyiğin ısıtıcıya girmeden önce sıcaklığını artırmak için kullanılmaktadır. Böylece ısıtıcıda

eriyiğe verilmesi gerekli ısı enerjisi azaltılarak sistemin soğutma etkinliği (STK) artırılabilir. Aşağıda $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ve $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ eriyiği kullanan soğurmalı soğutma sistemlerinin termodinamik analizi yer almaktadır.



Şekil 1. Tek kademeli soğurmalı soğutma sisteminin şemantik gösterimi

2.1. Amonyak-Su ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) Eriyiği Kullanan SSS'nin Termodinamik Analizi

Isıtıcıda kütle dengesi yazılırsa aşağıda verilen eşitlikler elde edilir.

$$\dot{m}_z = \dot{m}_f + \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (\text{toplam kütle dengesi}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_z \cdot X_z = \dot{m}_f \cdot X_f + \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (\text{amonyak dengesi}) \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'den

$$\dot{m}_z = \frac{1 - X_f}{X_z - X_f} \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (3)$$

$$\dot{m}_f = \frac{1 - X_z}{X_z - X_f} \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (4)$$

elde edilir. Eşitlik 3'den sistemin dolaşım oranı, FR

$$FR = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_{NH_3}} \quad (5)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda amonyağın birim kütlesi için ısıtıcı kapasitesi

$$q_l = h_1 + (FR - 1).h_8 - FR.h_7 \quad (6)$$

olarak bulunur. Eriyik eşanjöründeki enerji dengesinden (Sun, 1998)

$$T_9 = E_{ex}.T_6 + (1 - E_{ex}).T_8 \quad (7)$$

$$h_7 = h_6 + \frac{FR - 1}{FR}(h_8 - h_9) \quad (8)$$

Pompa çıkış şartları ve pompa için gerekli güç ise

$$h_6 = h_5 + (P_y - P_b).v_z \quad (9)$$

$$W_p = (P_y - P_b).v_z.\dot{m}_z \quad (10)$$

eşitlikleriyle bulunabilir. Soğurucudan ayrılan amonyak bakımından zengin eriyiğin pompalanması için soğutucu akışkanın (amonyağın) birim kütlesi başına gerekli güç

$$w_p = (P_y - P_b).v_z.FR \quad (11)$$

Sonuç olarak, sistemdeki diğer elemanlar (buharlaştırıcı, yoğuşturucu, soğurucu) için de enerji dengesi yazıldığında amonyağın birim kütlesi başına kapasiteleri

$$q_b = h_4 - h_3 \quad (12)$$

$$q_y = h_1 - h_2 \quad (13)$$

$$q_s = FR.h_5 - (FR - 1).h_{10} - h_4 \quad (14)$$

2.2. Su-Lityum Bromür (H₂O-LiBr) Eriyiği Kullanan SSS'nin Termodinamik Analizi

Isıtıcıda kütle dengesi yazılırsa aşağıda verilen eşitlikler elde edilir.

$$\dot{m}_f = \dot{m}_z + \dot{m}_{H_2O} \quad (\text{toplam kütle dengesi}) \quad (15)$$

$$\dot{m}_f.X_f = \dot{m}_z.X_z \quad (\text{LiBr dengesi}) \quad (16)$$

Eşitlik 15 ve Eşitlik 16'dan

$$\dot{m}_z = \frac{X_f}{X_z - X_f} \dot{m}_{H_2O} \quad (17)$$

$$\dot{m}_f = \frac{X_z}{X_z - X_f} \dot{m}_{H_2O} \quad (18)$$

elde edilir. Eşitlik 17'den sistemin dolaşım oranı, FR

$$FR = \frac{m_{\dot{z}}}{m_{\dot{H}_2O}} \quad (19)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda su buharının birim kütlesi için ısıtıcı kapasitesi

$$q_l = h_1 + FR.h_8 - (FR + 1).h_7 \quad (20)$$

olarak bulunur. Eriyik eşanjöründeki maksimum ısı geçişini belirleyen akışkan fakir eriyik ise, eşanjördeki enerji dengesinden

$$h_7 = E_{ex}.h_{8*} + (1 - E_{ex}).h_6 \quad (21)$$

$$h_9 = h_8 - E_{ex} \frac{(FR + 1)}{FR} (h_{8*} - h_6) \quad (22)$$

elde edilir. Burada h_{8*} , fakir eriyiğin T_8 sıcaklığındaki entalpisidir. Çünkü fakir eriyik en fazla T_8 sıcaklığına kadar çıkabilir. Eğer, $E_{ex} = 1$ olması durumunda $T_9 < T_6$ oluyorsa eriyik eşanjöründeki maksimum ısı geçişini belirleyen akışkan zengin eriyik demektir. Bu durumda, eriyik eşanjöründeki enerji dengesinden

$$h_9 = E_{ex}.h_{6*} + (1 - E_{ex}).h_8 \quad (23)$$

$$h_7 = h_6 + E_{ex} \frac{FR}{(FR + 1)} (h_8 - h_{6*}) \quad (24)$$

elde edilir. Burada h_{6*} , zengin eriyiğin T_6 sıcaklığındaki entalpisidir. Çünkü zengin eriyik en fazla T_6 sıcaklığına kadar inebilir. Soğurucudan ayrılan lityum bromür bakımından fakir eriyiğin pompalanması için soğutucu akışkanın (su buharının) birim kütlesi başına gerekli güç

$$w_p = (P_y - P_b).v_f.(FR + 1) \quad (25)$$

Su buharının birim kütlesi başına soğurucunun kapasitesi ise

$$q_s = (FR + 1).h_5 - FR.h_{10} - h_4 \quad (26)$$

Soğutma sistemlerinin performansını gösteren STK değeri, harcanan birim iş başına yapılan soğutma miktarı olup

$$STK = \frac{q_b}{q_l + w_p} \quad (27)$$

şeklinde tanımlanır. Eğer buharlaştırıcı, yoğuşturucu, ısıtıcı ve soğurucu sıcaklıkları bilirse, yukarıda verilen denklemler yardımıyla sistemlerin performans eğrileri elde edilebilir.

3. TERMODİNAMİK ÖZELLİKLER

Amonyak (NH_3)

Amonyakın sıcaklığa bağlı doyma basıncını veren denklem aşağıda verilmiştir (Horuz, 1990).

$$\text{Log}P(T) = a_0 + \frac{a_1}{(T.1,8 + 491,7)} + \frac{a_2}{(T.1,8 + 491,7)^2} \quad (28)$$

Amonyanın doymuş sıvı ve doymuş buhar entalpisi sıcaklığa bağlı olarak ve kızgın buhar entalpisi ise sıcaklık ve basınca bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Horuz, 1990).

$$h_{sv}(T) = 2,326.(b_0 + b_1.(T.1,8 + 32)) \quad (29)$$

$$h_{bh}(T) = c_0 + c_1.T + c_2.T^2 + c_3.T^3 \quad (30)$$

$$h_{kbh}(P,T) = 2,326.\{[d_0.(T.1,8 + 32) + d_1] + P.[d_2.(T.1,8 + 32) + d_3]\} \quad (31)$$

Eşitlik 28, 29, 30 ve Eşitlik 31'de kullanılan katsayıların değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Eşitlik 28, 29, 30 ve Eşitlik 31'de kullanılan katsayılar

i	a	b	c	d
0	6,59924	42,318716	1443,5	$5,0669.10^{-1}$
1	-1721,24882	1,11063342	1,0577	620,97863
2	-112599,5598	-	$7,66.10^{-3}$	$1,5.10^{-4}$
3	-	-	$1,10.10^{-5}$	$4,061.10^{-2}$

Amonyak-Su (NH_3-H_2O) Eriyiği

Amonyak-su karışımının doyma basıncı ve sıcaklığı arasındaki ilişki, karışımın konsantrasyonuna bağlı olarak (Sun, 1998)

$$\text{Log}P(T, X) = A - \frac{B}{(T + 273,16)} \quad (32)$$

Burada;

$$A = 7,44 - 1,767.X + 0,9823.X^2 + 0,3627.X^3 \quad (32a)$$

$$B = 2013,8 - 2155.X + 1540,9.X^2 - 194,7.X^3 \quad (32b)$$

Amonyak-su eriyiğinin entalpisi, sıcaklık ve konsantrasyona bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Sun, 1998).

$$h(T, \bar{X}) = 100. \sum_{i=1}^{16} a_i \left(\frac{T + 273,16}{273,16} - 1 \right)^{m_i} . \bar{X}^{n_i} \quad (33)$$

Burada, \bar{X} amonyanın mol oranı olup Eşitlik (33a) ile bulunabilir (Sun, 1998).

$$\bar{X} = \frac{18,015.X}{18,015.X + 17,03.(1 - X)} \quad (33a)$$

Amonyak-su eriyiğinin özgül hacmi, sıcaklık ve konsantrasyona bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Sun, 1998).

$$v(T, X) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{ij} . T^i . X^j \quad (34)$$

Çizelge 2. Eşitlik 33'de kullanılan katsayılar

i	m _i	n _i	a _i	i	m _i	n _i	a _i
1	0	1	7,61080.10 ⁰	9	2	1	2,84179.10 ⁰
2	0	4	2,56905.10 ¹	10	3	3	7,41609.10 ⁰
3	0	8	-2,47092.10 ²	11	5	3	8,91844.10 ²
4	0	9	3,25952.10 ²	12	5	4	-1,61309.10 ³
5	0	12	-1,58854.10 ⁰	13	5	5	6,22106.10 ²
6	0	14	6,19084.10 ¹	14	6	2	-2,07588.10 ²
7	1	0	1,14314.10 ¹	15	6	4	-6,87393.10 ⁰
8	1	1	1,18157.10 ¹	16	8	0	3,50716.10 ⁰

Çizelge 3. Eşitlik 34'de kullanılan katsayılar

i	j	a _{ij}	i	j	a _{ij}	i	j	a _{ij}	i	j	a _{ij}
0	0	9,9842.10 ⁻⁴	0	1	3,5489.10 ⁻⁴	0	2	-1,2006.10 ⁻⁴	0	3	3,2426.10 ⁻⁴
1	0	-7,8161.10 ⁻⁸	1	1	5,2610.10 ⁻⁶	1	2	-1,0567.10 ⁻⁵	1	3	9,8890.10 ⁻⁶
2	0	8,7601.10 ⁻⁹	2	1	-8,4137.10 ⁻⁸	2	2	2,4056.10 ⁻⁷	2	3	-1,8715.10 ⁻⁷
3	0	-3,9076.10 ⁻¹¹	3	1	6,4816.10 ⁻¹⁰	3	2	-1,9851.10 ⁻⁹	3	3	1,7727.10 ⁻⁹

Su (H₂O)

Su buharının sıcaklığa bağlı doyma basıncını veren denklem aşağıda verilmiştir (Horuz, 1990).

$$P(T) = 10^A \cdot 6,89643 \quad (35)$$

Burada,

$$A = a_0 + \frac{a_1}{(T \cdot 1,8 + 491,7)} + \frac{a_2}{(T \cdot 1,8 + 491,7)^2} \quad (35a)$$

Su buharının doymuş ve kızgın buhar entalpisini, sıcaklığa ve basınca bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Horuz, 1990).

$$h(P, T) = 2,326 \cdot \{ [b_0 \cdot (T \cdot 1,8 + 32) + b_1] + P \cdot [b_2 \cdot (T \cdot 1,8 + 32) + b_3] \} \quad (36)$$

Eşitlik 35 ve Eşitlik 36'daki katsayıların değerleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Eşitlik 35 ve Eşitlik 36'da kullanılan katsayılar

i	a	b
0	6,21147	0,44942
1	-2886,373	1060,80
2	337269,46	0,00274
3	-	0,989805

Su-Lityum Bromür (H₂O-LiBr) Eriyiği

Su-lityum bromür eriyiğinin sıcaklığı aşağıda verilen denklem yardımıyla bulunabilir (Horuz, 1990).

$$T = A \cdot T_{bhd} + B \quad (37)$$

Burada;

$$A = -2,00755 + 0,16976.X - 3,1333.10^{-3}.X^2 + 1,97668.10^{-5}.X^3 \quad (37a)$$

$$B = 124,937 - 7,716.X + 0,152286.X^2 - 7,9509.10^{-4}.X^3 \quad (37b)$$

Su-lityum bromür eriyiğinin entalpisi, sıcaklık ve konsantrasyona bağlı olarak aşağıda verilmiştir (Horuz, 1990).

$$h(T, X) = 2,326.(A + B.(T.1,8 + 32) + C.(T.1,8 + 32)^2) \quad (38)$$

Burada;

$$A = a_0 + a_1.X + a_2.X^2 + a_3.X^3 + a_4.X^4 \quad (38a)$$

$$B = b_0 + b_1.X + b_2.X^2 + b_3.X^3 + b_4.X^4 \quad (38b)$$

$$C = c_0 + c_1.X + c_2.X^2 + c_3.X^3 + c_4.X^4 \quad (38c)$$

Çizelge 5. Eşitlik 38'de kullanılan katsayılar

i	a	b	c
0	-1015,07	4,68108	4,9107.10 ⁻³
1	79,5387	-0,3037766	3,83184.10 ⁻⁴
2	-2,358016	8,44845.10 ⁻³	1,078963.10 ⁻⁵
3	3,031583.10 ⁻²	-1,047721.10 ⁻⁴	1,3152.10 ⁻⁷
4	-1,400261.10 ⁻⁴	4,80097.10 ⁻⁷	-5,8970.10 ⁻¹⁰

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Amonyak-su ve su-lityum bromür eriyiği kullanan soğurmalı soğutma sistemlerinin performansının belirlenebilmesi için *Termodinamik Özellikler* kısmında verilen ifadelerden yararlanarak, temel enerji ve kütle dengesi denklemleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Çevrimin simülasyonu oluşturularak, farklı ısıtıcı, buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve soğurucu sıcaklıklarında sistemin performansı incelenmiştir. Çizelge 6'da $T_1=90^\circ\text{C}$, $T_y=40^\circ\text{C}$, $T_s=35^\circ\text{C}$, $T_b=10^\circ\text{C}$ için çevrimin çeşitli noktalarında eriyiklerin termodinamik özellikleri verilmiştir. Burada eriyik eşanjörünün etkenliği 0,6 alınmıştır. Çizelgede görüldüğü gibi $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çevriminde soğutucu akışkan olarak amonyak dolaştığından, sistemin basınçları su-lityum bromür çevrimine göre daha yüksektir ve iki çevrimin termodinamik özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle Çizelge 7'de görüldüğü gibi çevrimdeki her elemanın ısıl kapasiteleri de birbirinden oldukça farklıdır. Çizelge 7'de sistemin çalışma şartları Çizelge 6'daki ile aynı alınmıştır. Çizelge 7'de dikkati çeken hususlardan biri ısıtıcının sistemdeki diğer elemanlara göre ısıl kapasitesinin yüksek oluşu ve pompanın ise ihmal edilebilecek düzeyde enerji tükettiğidir. Amonyaklı sistemde pompalama için gerekli enerjinin daha fazla olmasının nedeni olarak, basınç farkının lityum bromürlü sisteme göre çok daha fazla olması gösterilebilir. Aynı çalışma şartlarında (sıcaklıklarında) lityum bromürlü sistemin amonyaklı sisteme göre daha fazla soğutma elde ettiği ve sistemin performans katsayısının daha yüksek olduğu yine verilen çizelgeden görülmektedir.

Çizelge 6. Çevrimin çeşitli noktalarında NH₃-H₂O ve H₂O-LiBr eriyiklerinin termodinamik özellikleri

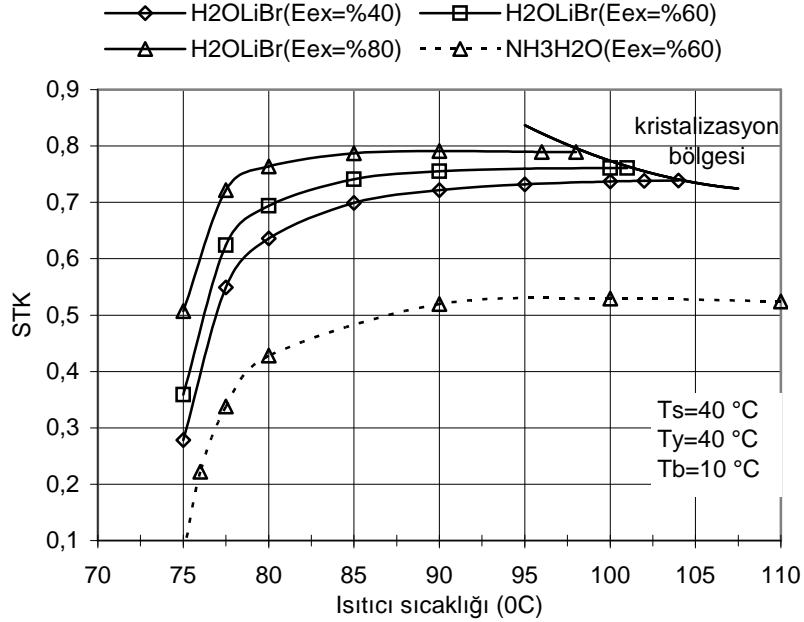
Konum	T (°C)	P (kPa)	X (%)	h (kJ/kg)
NH₃-H₂O Çevrimi				
Isıtıcıdan amonyağın çıkışı (1)	90,00	1553,816	100,00	1631,438
Yoğuşturucudan amonyağın çıkışı (2)	40,00	1553,816	100,00	367,100
Buharlaştırıcıdan amonyağın çıkışı (4)	10,00	614,947	100,00	1453,300
Soğurucudan eriyiğin çıkışı (5)	35,00	614,947	58,67	-81,126
Isıtıcıya eriyiğin girişi (7)	60,38	1553,816	58,67	39,348
Isıtıcıdan eriyiğin çıkışı (8)	90,00	1553,816	44,99	160,607
Soğurucuya eriyiğin girişi (10)	57,13	614,947	44,99	1,633
H₂O-LiBr Çevrimi				
Isıtıcıdan su buharının çıkışı (1)	90,00	7,384	0,00	2662,35
Yoğuşturucudan suyun çıkışı (2)	40,00	7,384	0,00	167,60
Buharlaştırıcıdan su buharının çıkışı (4)	10,00	1,227	0,00	2517,25
Soğurucudan eriyiğin çıkışı (5)	35,00	1,227	52,04	74,82
Isıtıcıya eriyiğin girişi (7)	59,12	7,384	52,04	126,56
Isıtıcıdan eriyiğin çıkışı (8)	90,00	7,384	62,10	221,22
Soğurucuya eriyiğin girişi (10)	57,00	1,227	62,10	159,48

Çizelge 7. Çevrimdeki her elemanın birim soğutucu akışkan kütlesi için kapasiteleri

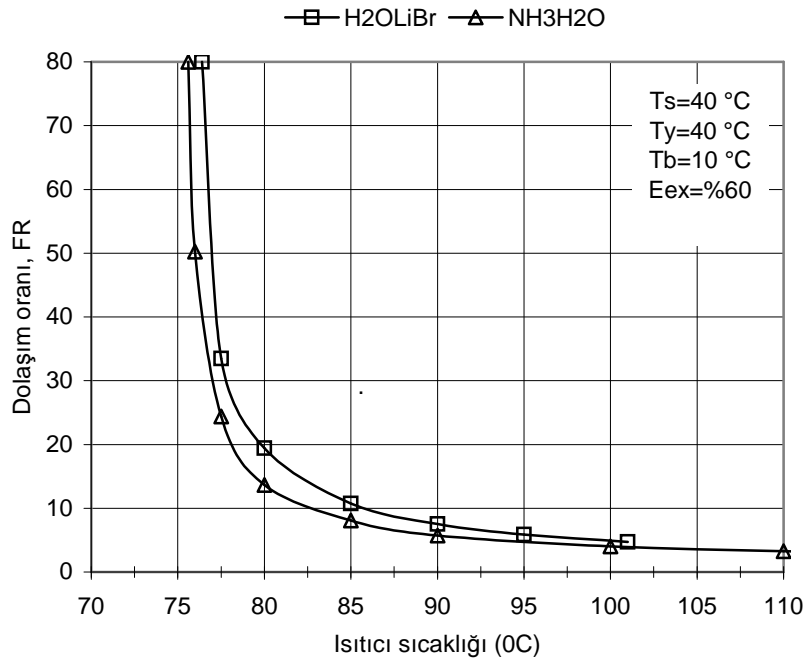
Kapasiteler (kJ/kg)	NH ₃ -H ₂ O Çevrimi	H ₂ O-LiBr Çevrimi
Isıtıcı (q _i)	1958,738	3025,700
Yoğuşturucu (q _v)	1264,338	2494,750
Buharlaştırıcı (q _b)	1086,211	2349,656
Soğurucu (q _s)	1784,664	2880,625
Pompa (w _p)	4,064	0,024
Eşanjör (q _{ex})	480,686	319,533
STK	0,553	0,777

Şekil 2’de NH₃-H₂O ve H₂O-LiBr çevrimleri için ısıtıcı sıcaklığı ile STK değerinin değişimi görülmektedir. Sistemin çalışma şartları şekil üzerinde verilmiştir. Her iki çevrimde de ısıtıcı sıcaklığının artışıyla sistemin STK değeri artmaktadır. NH₃-H₂O için STK, yaklaşık 95°C’ye kadar artmakta ve bu sıcaklıktan sonra %52 dolaylarında sabit kalmaktadır. 80°C’den daha düşük sıcaklıklarda ise STK’da ani düşme gözlenmektedir. Isıtıcı sıcaklığının artmasıyla fakir eriyik konsantrasyonu azaldığından dolaşım oranı (FR değeri) azalmaktadır. Dolaşım oranının azalması ise ısıtıcı kapasitesini düşürür, böylece aynı soğutmayı elde etmek için harcanan iş azaldığından STK artar. H₂O-LiBr çevriminde ise, ısıtıcı sıcaklığının artmasıyla zengin eriyik konsantrasyonu artar ve bu sebeple dolaşım oranının azalması suretiyle STK artar. H₂O-LiBr çevrimi için de 80°C’nin altındaki ısıtıcı sıcaklıklarında performansın aniden düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda verilen şekilde eriyik eşanjörünün farklı etkenlik değerlerinde (%40, %60 ve %80) sistemin STK eğrileri de yer almaktadır. Doğal olarak, eşanjörün etkenliği arttıkça sistemin STK değeri ile beraber kristalizasyon ihtimali de artmaktadır. Şekil 3’de ısıtıcı sıcaklığı ile dolaşım oranının değişimi verilmiştir. Isıtıcı sıcaklığının artması, NH₃-H₂O çevriminde fakir eriyik konsantrasyonunu azaltarak, H₂O-LiBr

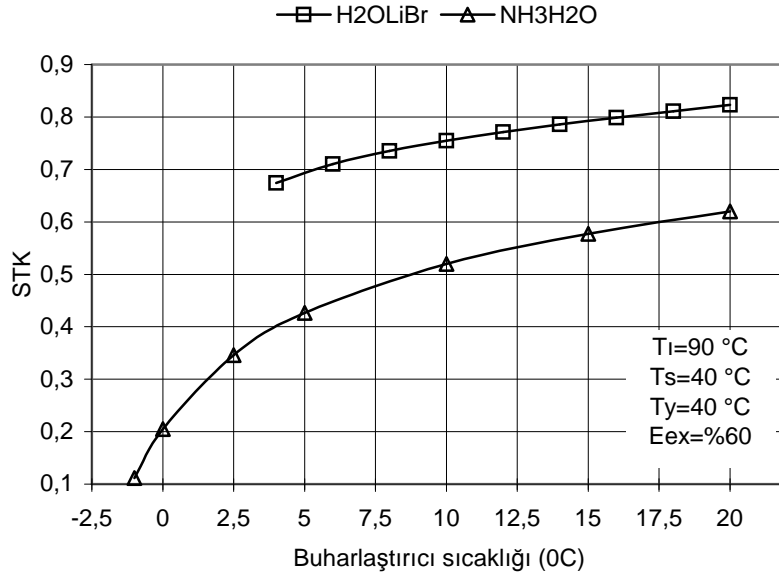
çevriminde zengin eriyik konsantrasyonu artırarak dolaşım oranını azaltmaktadır. Dolaşım oranının azalması pompalama maliyetlerini de azaltmaktadır. Şekil 3'den, yine yaklaşık 80°C'den daha düşük sıcaklıklarda dolaşım oranının ani olarak arttığı görülmektedir. Böylece Şekil 2 ve 3'den yararlanarak her iki sistem için ısıtıcı çalışma sıcaklığı belirlenebilir. Şekil 4 ve 5'de her iki çevrim için buharlaştırıcı sıcaklığı ile STK değerinin ve dolaşım oranının değişimi görülmektedir. Hem NH₃-H₂O hem de H₂O-LiBr çevrimleri için buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça, STK artmaktadır.



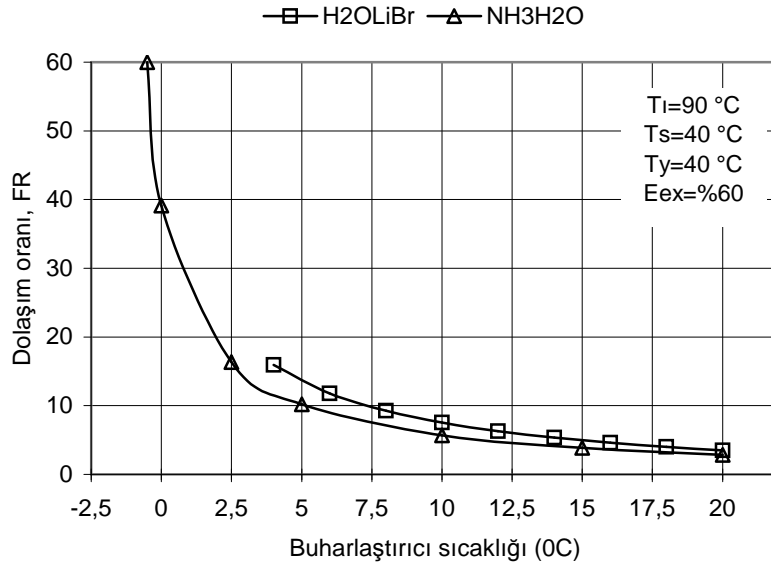
Şekil 2. SSS'nde STK'nın ısıtıcı sıcaklığı ile değişimi



Şekil 3. SSS'nde FR'nin ısıtıcı sıcaklığı ile değişimi



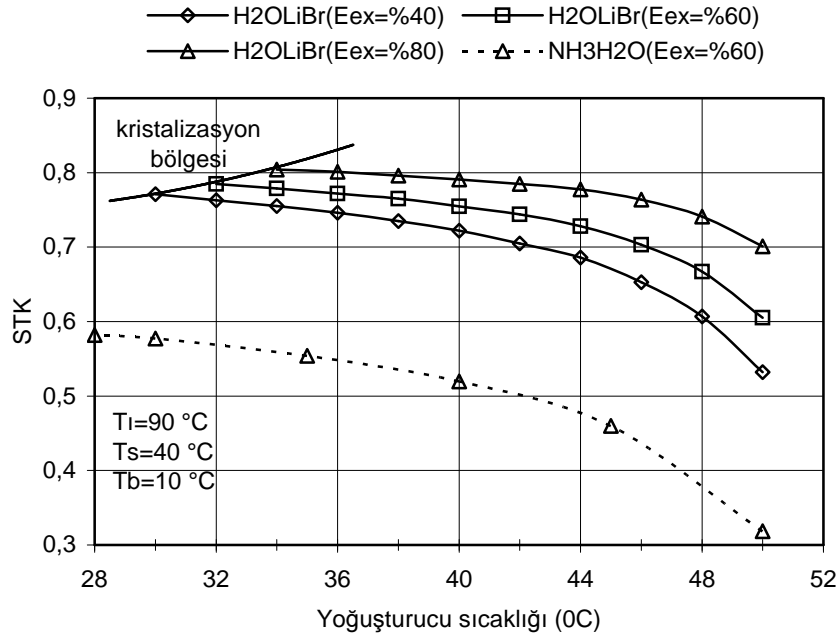
Şekil 4. SSS'nde STK'nın buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişimi



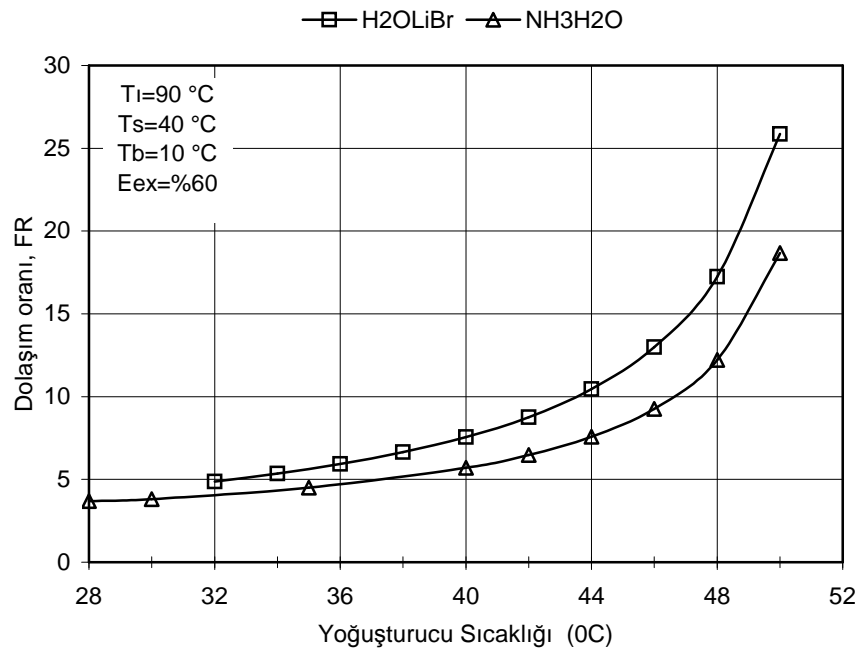
Şekil 5. SSS'nde FR'nin buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişimi

NH₃-H₂O çevriminde buharlaştırıcı sıcaklığının yaklaşık -1°C'nin altına düşmesi durumunda fakir eriyiğin konsantrasyonu zengin eriyiğin konsantrasyonunu aşmaktadır. Bu sebeple verilen şartlarda buharlaştırıcı sıcaklığı -1°C'nin altına inemez. Buharlaştırıcı sıcaklığının artmasıyla NH₃-H₂O çevriminde zengin eriyik konsantrasyonu artar, H₂O-LiBr çevriminde fakir eriyik konsantrasyonu azalır. Bu sebeple her iki çevrimde de buharlaştırıcı sıcaklığının artışıyla dolaşım oranı azalmaktadır. Şekil 6 ve 7'de yoğuşturucu sıcaklığı ile STK değerinin ve dolaşım oranının değişimi görülmektedir. Her iki çevrimde de yoğuşturucu sıcaklığının artmasıyla STK değerindeki düşüş artarak devam etmektedir. Yoğuşturucu sıcaklığının değişmesi sistemin üst basıncını etkilemektedir. Bu etki NH₃-H₂O çevriminde

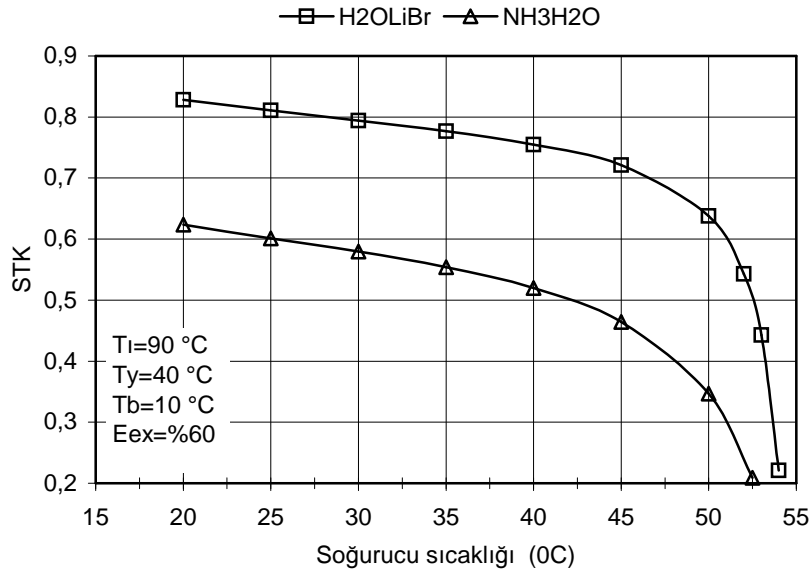
fakir eriyik konsantrasyonu artırmakta, $H_2O-LiBr$ çevriminde ise zengin eriyik konsantrasyonunu azaltmaktadır. Böylece iki çevrimde de yoğuşturucu sıcaklığıyla dolaşım oranı artmaktadır. $H_2O-LiBr$ çevriminde eriyik eşanjörü etkinliğinin 0,6 olması durumunda yoğuşturucu sıcaklığının inebileceği minimum değer yaklaşık $32^\circ C$ 'dir. Bu sıcaklığın altında kristalizasyon problemi vardır. Çünkü yoğuşturucu sıcaklığı düştükçe zengin eriyik konsantrasyonu artmakta ve bu da kristalizasyon ihtimalini artırmaktadır. Aynı zamanda Şekil 6'da eriyik eşanjörü etkinliğiyle kristalizasyon bölgesinin değişimi de görülmektedir.



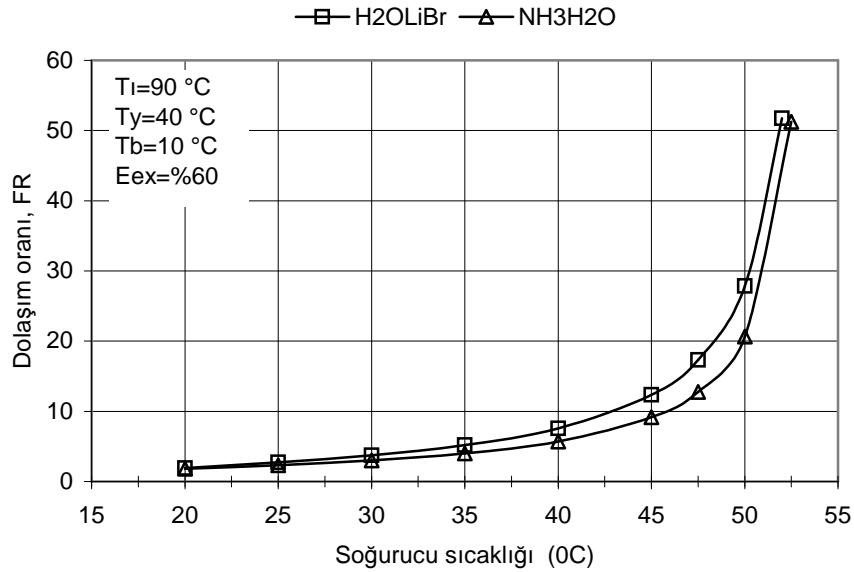
Şekil 6. SSS'nde STK'nın yoğuşturucu sıcaklığı ile değişimi



Şekil 7. SSS'nde FR'nin yoğuşturucu sıcaklığı ile değişimi



Şekil 8. SSS'nde STK'nın soğurucu sıcaklığı ile değişimi



Şekil 9. SSS'nde FR'nin soğurucu sıcaklığı ile değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9'da soğurucu sıcaklığı ile STK değerinin ve dolaşım oranının değişimi görülmektedir. İki çevrimde de soğurucu sıcaklığı arttıkça STK değeri azalmaktadır ve bu azalma soğurucu sıcaklığıyla artarak devam etmektedir. Özellikle 50°C'nin üzerinde ani bir azalma gözlemlenmektedir. Çünkü soğurucu sıcaklığının artması NH₃-H₂O çevriminde zengin eriyik konsantrasyonunu azaltarak ve H₂O-LiBr çevriminde fakir eriyik konsantrasyonunu artırarak dolaşım oranını artırmaktadır. Dolaşım oranındaki artış özellikle 50°C'nin üzerinde bir sıçrama şeklinde gerçekleştiğinden ısıtıcı kapasitesi artmakta ve STK değeri ani olarak düşmektedir.

5. SONUÇLAR

Soğurmalı soğutma sistemleri özellikle son yıllarda, dünyada ve ülkemizde yaşanan ekonomik krizlerden ve mevcut enerji potansiyellerinin kullanılabilirliğinin azalmasından dolayı, eski itibarını kazanmaya başlamıştır. H₂O-LiBr eriyiğiyle çalışan soğurmalı soğutma sistemleri çoğunlukla 4°C ve üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmakta, NH₃-H₂O eriyiğiyle çalışan sistemler ise 0°C'nin altındaki soğutma uygulamalarında da kullanılabilirlerdir.

Bu çalışmada, NH₃-H₂O ve H₂O-LiBr eriyiği kullanan soğurmalı soğutma çevrimlerinin analizi yapılmış ve termodinamik özellikleri denklemler yardımıyla verilmiştir. Bu iki çevrimin performansı farklı ısıtıcı, buharlaştırıcı, yoğuşurucu ve soğurucu sıcaklıklarında incelenmiştir. Yapılan analiz sonucu elde edilen bulgular özetle şunlardır;

1. Her iki sistemde de ısıtıcı ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının artmasıyla STK artmakta ancak yoğuşurucu ve soğurucu sıcaklıklarının artmasıyla STK azalmaktadır.
2. Aynı sıcaklıklar arasında çalışan H₂O-LiBr eriyiği kullanan sistemin STK ve FR değerleri NH₃-H₂O eriyiği kullanan sisteme göre daha fazla çıkmaktadır.
3. NH₃-H₂O eriyiği kullanan sistem daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duymaktadır.
4. NH₃-H₂O eriyiği kullanan sistemde çevrimin soğutma kısmında amonyak dolaştığından sistem daha yüksek basınçlarda çalışmaktadır.
5. H₂O-LiBr eriyiği kullanan sistemde ısıtıcı sıcaklığı arttıkça ve yoğuşurucu sıcaklığı azaldıkça kristalizasyon ihtimali artmaktadır.
6. Kristalizasyon riski eriyik eşanjörü etkinliğinin artmasıyla (zengin eriyiğin sıcaklığının azalmasıyla) artmaktadır.
7. Her iki sistemde de FR değerinin artması, soğutucu akışkanın birim kütlesi başına pompanın çekmiş olduğu enerjiyi artırmaktadır.

6. SEMBOLLER

Semboller

SSS	: Soğurmalı soğutma sistemi
STK	: Soğutma tesir katsayısı, boyutsuz
E	: Eriyik eşanjörü etkinliği, boyutsuz
FR	: Dolaşım oranı, boyutsuz
h	: Entalpi, kJ/kg
\dot{m}	: Kütleli debi, kg/s
P	: Basınç, kPa
q	: Soğutucu akışkanın birim kütlesi için ısı kapasite, kJ/kg
Q	: Isıl güç, kW
T	: Sıcaklık, °C
v	: Eriyiğin özgül hacmi, m ³ /kg
w	: Soğutucu akışkanın birim kütlesi başına pompanın çektiği enerji, kJ/kg
W	: Pompanın birim zamanda çektiği enerji, kW
X	: Konsantrasyon

Alt indisler

b	: Buharlaştırıcı
bh	: Buhar
bhd	: Doymuş subuharı
ex	: Eşanjör
f	: Fakir
ı	: Isıtıcı
kbh	: Kızgın buhar
max	: Maksimum
min	: Minimum
NH ₃	: Amonyak
ort	: Ortalama
P	: Pompa
s	: Soğurucu
sv	: Sıvı
y	: Yoğuşurucu
z	: Zengin

KAYNAKLAR

- Chuang C.C., Ishida M. (1990): "Comparison of Three Types of Absorption Heat Pumps Based on Energy Utilization Diagrams", ASHRAE Transactions, 96 (2), pp. 275-281.
- Horuz İ. (1990): "Absorpsiyonlu Soğutma Sistemlerinden Amonyak-Su Çifti İle Lityum Bromür-Su Çiftinin Mukayesesi", Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 147s.
- Keçeciler A., Acar İ.H., Doğan A. (2000): "Thermodynamic Analysis of The Absorption Refrigeration System with Geothermal Energy: An Experimental Study", Energy Conversion and Management, Vol. 41, p.37-48.
- Mostafavi M., Agnew B. (1996): "The Impact of Ambient Temperature on Lithium Bromide-Water Absorption Machine Performance", Applied Thermal Engineering, Vol. 16, No. 6, p.515-522.
- Saravanan R., Maiya M. P. (1998): "Thermodynamic Comparison Of Water Based Working Fluid Combinations For A Vapour Absorption Refrigeration System", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, No. 7, p.553-568.
- Seara J.F., Vazquez, M. (2001): "Study and Control Optimal the Generation Temperature in NH₃-H₂O Absorption Refrigeration Systems", Applied Thermal Engineering, Vol. 21, p.343-357.
- Seewald J.S., Blanco H.P. (1994): "A Simple Model for Calculating the Performance of a Lithium Bromide-water Coil Absorber", ASHRAE Transactions, p.318-328.
- Sun D.W. (1998): "Comparison of the Performance of NH₃-H₂O, NH₃-LiNO₃ and NH₃-NaSCN Absorption Refrigeration Systems", Energy Conversion, Vol.39, No.5/6, p.357-368.