

## تحلیل انرژی و انرژی سیستم های تبرید جذبی لیتیم بروماید- آب

مهران اکبرپور غازانی\*

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

محسن تقفیان

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### چکیده

سیستم‌های تبرید جذبی به دلیل دارا بودن قابلیت استفاده از انرژی و گرمای خروجی از دیگر سیستم‌ها مورد توجه دانشمندان قرار گرفته اند. پایین بودن کارایی آنها باعث ارایه آرایش‌های متعددی برای این سیستم‌ها از طرف دانشمندان شده است. بررسی این سیستم‌ها از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک باعث پیدا کردن دلایل مختلف پایین بودن کارایی آنها خواهد شد. در این مقاله تغییرات ضریب عملکرد و بازده انرژی‌تبریدی سیستم تبرید جذبی تک اثره و دو و سه اثره جریان سری و موازی لیتیم بروماید آب با تغییرات دمای ژنراتور دما بالا در دماهای تبخیرکننده مختلف با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده در نرم افزار Engineering Equation Solver (EES) تحلیل شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده برتری سیستم‌های تبرید جذبی سه اثره نسبت به سیستم‌های دو اثره و تک اثره می‌باشد. این نتایج حاکی از برتری نسبی سیستم سه اثره موازی نسبت به سری است. همچنین نرخ میرد استفاده شده به گرمای داده شده به ژنراتور دما بالا برای سیستم‌های جریان موازی بیشتر از جریان سری و برای سیستم‌های سه اثره بیشتر از دو اثره و تک اثره می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم تبرید جذبی، لیتیم بروماید- آب، تحلیل انرژی، تحلیل انرژی.

## Energy and Exergy analysis of water- lithium bromide absorption systems

M. Akbarpour Ghazani

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

M. Saghafian

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### Abstract

Absorption systems have been in the spotlight of scientists due to their capability to utilize excess energy and heat produced by other working systems. One of the inhibitory factors in using these systems is their low efficiency. This inhibitory factor has been a reason for scientists to propose different configurations for these systems. Investigation of these systems using the second law of thermodynamics could lead to understanding of the reasons behind their low efficiency. In this paper, variations of coefficient of performance and exergetic efficiency of single, double and triple effect parallel and series water-lithium bromide absorption systems with generator temperature in different evaporator temperatures are analyzed using a code written in Engineering Equation Solver (EES). The obtained results demonstrate the excellence of triple effect absorption systems in comparison to double and single effects. Exergetic efficiency increases 10 to 18 percent for each increase of complexity of system. These results also depicts the excellence of parallel systems to series ones. Also, the rate of refrigerant fluid working in the cycle to heat delivered to the high temperature generator is higher for parallel systems compared to series ones and is higher for triple effect systems.

**Keywords:** Absorption cooling cycle, Lithium bromide-water, Energy analysis, Exergy analysis.

سیستم‌های تبرید تراکمی این سیستم‌ها نیاز به کار محوری و در نتیجه مصرف انرژی بالا ندارند و هم چنین برای لایه‌ی اوزون مضر نیستند [۴-۷]. سیستم‌های تبرید جذبی در دسترس معمولاً از آب و لیتیم بروماید<sup>۲</sup> به عنوان سیال کارکن و بخار و آب داغ به عنوان منبع گرما استفاده می‌کنند. بر اساس سطح دمای در دسترس آرایش‌های متعددی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. در بین سیستم‌های تبرید جذبی سیستم‌های چند اثره ضریب عملکرد بهتری نسبت به بقیه دارند اما نیازمند دمای بیشتری هستند. بر اساس تعداد مبادله‌کن‌های گرمای مورد استفاده برای بازیابی گرما، سیستم‌ها به صورت تک اثره (یک مبادله‌کن گرما)، دو اثره (دو مبادله‌کن گرما) و سه اثره (سه مبادله‌کن گرما) طبقه بندی می‌شوند. با افزایش تعداد مبادله‌کن‌های گرما میزان پیچیدگی سیستم نیز افزایش می‌یابد [۸]. قانون اول ترمودینامیک<sup>۳</sup> برای ارزیابی ضریب عملکرد و بهبود بخشیدن پارامترهای عملکرد مورد استفاده قرار گرفته است. البته قانون اول با مصرف انرژی مرتبط

### ۱- مقدمه

بحران انرژی و مسایل زیست محیطی از قبیل گرم شدن کره‌ی زمین و تخریب لایه‌ی اوزون از مسایل مهم جهان امروز می‌باشد. محدودیت‌های زیست محیطی در استفاده از مبردهای کلروفلوروکربن<sup>۱</sup> (CFCs)، مشکل تولید و بالا بودن هزینه‌های استفاده از انرژی الکتریکی، محدودیت‌های قانونی و فنی در جهت استفاده‌ی بهینه از انرژی الکتریکی و ... از جمله مواردی است که بر اهمیت استفاده از چرخه‌های تبرید جذبی و جایگزینی آنها به جای چرخه‌های تبرید تراکمی افزوده است [۱-۳].

استفاده از انرژی‌های با کیفیت پایین مانند انرژی اتلافی در فرآیندهای صنعتی، گازهای خروجی خودروها و انرژی خورشیدی و همچنین سازگاری سیال عامل چرخه با محیط زیست و پایداری آن از دلایل اصلی مطرح شدن سیستم‌های تبرید جذبی می‌باشد. برخلاف

<sup>2</sup> Lithium bromide

<sup>3</sup> Thermodynamic

<sup>1</sup> Chlorofluorocarbon

است و بازگشت ناپذیری های داخل سیستم را نمی تواند ارزیابی کند. روش اگزرژی<sup>۱</sup> که به عنوان تحلیل قانون دوم شناخته شده است انهدام اگزرژی را که به وسیله بازگشت ناپذیری ها ایجاد می شوند محاسبه می کند [۹]. تحلیل اگزرژی سیستم های تبرید جذبی در دهه هشتاد همراه با ارزیابی نرخ انهدام اگزرژی و بازده اگزرژی آغاز شد [۱۰-۱۳]. مطالعات بر روی دماهای عملکرد و کارایی مبادله کن های گرما برای چرخه های تک اثره با سیال های عامل آب-لیتیم بروماید و آب-آمونیاک<sup>۲</sup> انجام شده است [۱۴، ۱۵].

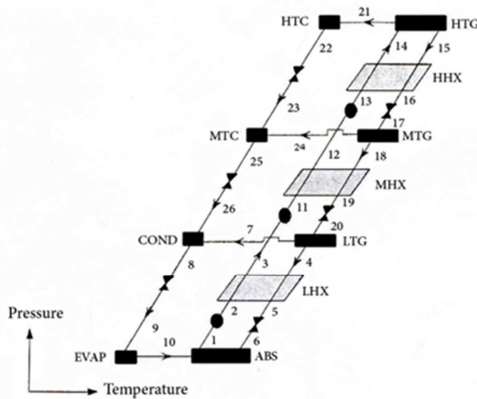
تحلیل قانون اول و دوم سیستم های تبرید جذبی برای کاربردهای سرمایه و گرمایش در سال ۲۰۰۱ توسط لی و شریف گزارش شده است [۱۶]. تعدادی از محققان از جمله آرزو سنجان و یاکوت در سال ۲۰۰۵ این سیستم ها را از لحاظ اگزرژی تحلیل کرده اند [۱۷]. آناند و همکاران تاثیر کارایی مبادله کن گرما روی چرخه را در نظر گرفته و بیشترین افزایش در بازده اگزرژی را به وسیله اصلاح مبادله کن گرما مبرد و محلول به دست آوردند [۱۱]. جونگ از تحلیل اگزرژی برای به دست آوردن یک طراحی بهینه برای چرخه تبرید استفاده کرد. با این وجود کارهای کمی بر روی سیستم های سه اثره انجام شده است [۱۸]. گلابرس و همکاران سیستم های تبرید جذبی سه اثره را از لحاظ قانون اول و دوم تحلیل کرده اند و تغییرات ضریب عملکرد و بازده اگزرژی را با تغییرات دمای ژنراتور<sup>۳</sup> به دست آورده اند. مقایسه ی نتایج مطالعات مختلف معمولاً مشکل است و نتایج به دست آمده متفاوت هستند. اصولاً این تفاوت ها به علت روش ها و فرضیه های مختلف مد نظر در تحلیل به وجود می آیند [۱۹]. بورگ دیز و همکاران یک سیستم جذبی سه گانه با سیال لیتیم کلراید-آب که گرما را از طریق یک حوضچه دفع می کند معرفی کردند. آن ها توانستند به کاهش نرخ داخلی بازگشت<sup>۴</sup>، ۱۲/۴۵٪ و ۶۸٪ در تولید گازهای گلخانه ای برسند [۲۰]. در یک مطالعه دیگر ییلماز و همکاران سیستم تبرید جذبی دو اثره لیتیم بروماید-آب با چگالنده فشار بالا را از لحاظ ترمودینامیکی بررسی کردند و دریافتند که انتخاب دمای مناسب برای چگالنده فشار بالا می تواند ضریب عملکرد را افزایش دهد [۲۱]. اکبرپور و همکاران یک تحلیل ترمودینامیکی کامل و جامع از برج خنک کن تر جریان مخالف انجام دادند و حالت های بهینه ای برای آن یافتند [۲۲]. رزمی و همکارانش چرخه ترکیبی تبرید جذبی/تراکمی را معرفی و آنرا از دیدگاه انرژی و اگزرژی بررسی کرده و با چرخه تبرید جذبی تک اثره و تبرید تراکمی مقایسه کردند [۲۳].

هدف مطالعه ی حاضر تحقیق بر روی ضریب عملکرد و بازده اگزرجتیکی سیستم های تبرید جذبی سه اثره جریان سری و جریان موازی بوده و نحوه ی تغییرات این عوامل با تغییرات دمای ژنراتور در دماهای تبخیرکننده مختلف می باشد.

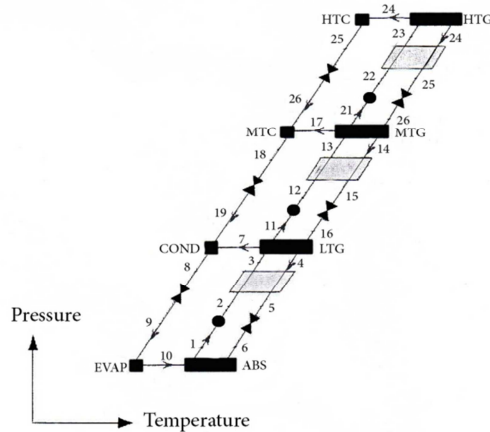
## ۲- شرح سیستم

شکل های (۱) و (۲) طرحواره ای از سیستم های تبرید جذبی سه

اثره ی جریان سری و جریان موازی را روی نمودار P-T نشان می دهد. در نوع جریان سری تمامی محلول ضعیف در ابتدا به ژنراتور دما بالا فرستاده می شود و پس از عبور از ژنراتور دما متوسط و ژنراتور دما پایین به سمت جاذب باز می گردد. در نوع جریان موازی عکس جریان سری تمامی محلول ضعیف در ابتدا به ژنراتور دما پایین فرستاده می شود. در واقع با اضافه شدن دو مرحله با دما و فشار بالاتر به چرخه تبرید جذبی تک اثره این سیستم تکمیل می گردد.



شکل ۱- طرحواره ای از چرخه تبرید جذبی سه اثره جریان سری روی نمودار P-T [۱۹]



شکل ۲- طرحواره ای از چرخه تبرید جذبی سه اثره جریان موازی روی نمودار P-T [۱۹]

همان طور که در شکل های بالا نشان داده شده است اجزای اصلی یک سیستم تبرید جذبی سه اثره عبارتند از: ژنراتور دما بالا، ژنراتور دما متوسط، ژنراتور دما پایین، جاذب، چگالنده، تبخیرکننده، شیرهای خفانش، مبادله کن های گرما، پمپ ها.

در سیستم تبرید جذبی سه اثره بخار مبرد در سه مرحله تولید می شود. اولین مرحله تولید به وسیله گرمای ورودی از منبع گرما در ژنراتور دما بالا است. دومین مرحله ی تولید مبرد به وسیله ی تبادل گرما بین چگالنده دما بالا و ژنراتور دما متوسط صورت می گیرد. در این مرحله از گرمایی که از چگالنده دفع می شود برای تولید بیشتر مبرد در ژنراتور دما متوسط استفاده می شود و همین کار باعث افزایش ضریب

<sup>1</sup> Exergy

<sup>2</sup> Ammonia-water

<sup>3</sup> Generator

<sup>4</sup> Internal Rate of Return

### ۲-۳- قانون اول

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک موازنه‌ی انرژی برای هر جز از سیستم به صورت زیر در می‌آید:

$$\left(\sum m_i \cdot h_i - \sum m_o \cdot h_o\right) + \left(\sum Q_i - \sum Q_o\right) + W = \dot{Q} \quad (۳)$$

که  $h$  آنتالپی مخصوص،  $Q$  گرمای مبادله شده و  $W$  کار مکانیکی ورودی یا خروجی از سیستم است.

معادلات موازنه‌ی انرژی برای اجزا سیستم تبرید جذبی سه اثره جریان سری به صورت زیر است:

چگالنده:

$$Q_{\text{cond}} = m_7 h_7 + m_{26} h_{26} - m_8 h_8 \quad (۴)$$

جاذب:

$$Q_{\text{abs}} = m_{10} h_{10} + m_6 h_6 - m_1 h_1 \quad (۵)$$

تبخیر کننده:

$$Q_{\text{evap}} = m_9 h_9 - m_{10} h_{10} \quad (۶)$$

ژنراتور دما بالا:

$$Q_{\text{gen}} = m_{15} h_{15} + m_{21} h_{21} - m_{14} h_{14} \quad (۷)$$

ژنراتور دما متوسط:

$$Q_{\text{mtg}} = m_{18} h_{18} + m_{24} h_{24} - m_{17} h_{17} \quad (۸)$$

ژنراتور دما پایین:

$$Q_{\text{ltg}} = m_4 h_4 + m_7 h_7 - m_{20} h_{20} \quad (۹)$$

چگالنده دما بالا:

$$Q_{\text{htc}} = m_{21} h_{21} - m_{22} h_{22} \quad (۱۰)$$

چگالنده دما پایین:

$$Q_{\text{mtc}} = m_{23} h_{23} + m_{24} h_{24} - m_{25} h_{25} \quad (۱۱)$$

پمپ فشار پایین:

$$W_{\text{pl}} = m_1 \cdot v_1 \cdot (P_m - P_1) \quad (۱۲)$$

پمپ فشار متوسط:

$$W_{\text{pm}} = m_{11} \cdot v_{11} \cdot (P_h - P_m) \quad (۱۳)$$

پمپ فشار پایین:

$$W_{\text{ph}} = m_{12} \cdot v_{12} \cdot (P_{hh} - P_h) \quad (۱۴)$$

کارایی مبادله‌کن‌های گرما:

$$\varepsilon_{\text{hhx}} = (T_{15} - T_{16}) / (T_{15} - T_{13}) \quad (۱۵)$$

$$\varepsilon_{\text{mhx}} = (T_{18} - T_{19}) / (T_{18} - T_{11}) \quad (۱۶)$$

$$\varepsilon_{\text{lnx}} = (T_4 - T_5) / (T_4 - T_2) \quad (۱۷)$$

و هم چنین معادلات انرژی برای سیستم تبرید جذبی سه اثره جریان موازی عبارتند از:

چگالنده:

$$Q_{\text{cond}} = m_7 h_7 + m_{19} h_{19} - m_8 h_8 \quad (۱۸)$$

جاذب:

$$Q_{\text{abs}} = m_{10} h_{10} + m_6 h_6 - m_1 h_1 \quad (۱۹)$$

تبخیر کننده:

$$Q_{\text{evap}} = m_9 h_9 - m_{10} h_{10} \quad (۲۰)$$

عملکرد می‌شود. سومین مرحله‌ی تولید مبرد در ژنراتور دما پایین و جذب گرما از چگالنده‌ی دما متوسط انجام می‌شود.

### ۳- مدل‌سازی سیستم تبرید جذبی

به منظور تحلیل ترمودینامیکی از دیدگاه انرژی و انرژی بایستی روابط مربوط به بقای جرم، بقای انرژی و معادلات مربوط به موازنه انرژی برای تک تک اجزا سیستم در نظر گرفته شود. در این راستا با تعیین داده‌های ورودی و اعمال فرضیاتی خروجی‌های مطلوب به دست می‌آیند. سیستم‌های تبرید جذبی به دلیل بازگشت ناپذیری زیاد اجزا آن در فرآیندهای انتقال گرما برای تحلیل روش انرژی مناسب می‌باشند. به منظور تعیین خواص ترمودینامیکی در تمامی نقاط چرخه هر جز به عنوان یک واحد در نظر گرفته شده است [۱۰].

برای تحلیل ترمودینامیکی چرخه از دیدگاه انرژی و انرژی فرض‌های زیر بر مساله حاکم است:

- مدل‌سازی سیستم در حالت پایا می‌باشد.
- از افت فشار در کلیه مبادله‌کن‌های گرما و لوله‌های رابط چشم پوشی شده است.
- حالت محلول‌های خروجی از ژنراتور و جاذب به صورت اشباع است.
- مبرد خروجی از چگالنده و تبخیرکننده به ترتیب به صورت مایع و بخار اشباع می‌باشد.
- هر سه مبادله‌کن گرما دارای کارایی یکسان هستند.
- از اتلاف گرما به محیط در اجزا سیستم صرف نظر می‌شود.
- فرآیند مربوط به شیرهای انبساط به صورت آنتالپی<sup>۱</sup> ثابت می‌باشد.

داده‌های ورودی مساله عبارتند از:

- دمای تبخیرکننده
- دمای چگالنده
- دمای جاذب
- دمای ژنراتور دما بالا
- مقدار دبی محلول خروجی از جاذب
- کارایی مبادله‌کن‌های گرما

$$T_{\text{cond}} = 25^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{abs}} = 25^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{abs}} = 1 \text{ kg/s}$$

$$\varepsilon = 80\%$$

### ۳-۱- قانون بقای جرم

موازنه‌ی جرم شامل موازنه‌ی جرم و هر جز از محلول است. معادلات حاکم بر بقای جرم برای حالت یکنواخت جریان یکنواخت سیستم عبارتند از:

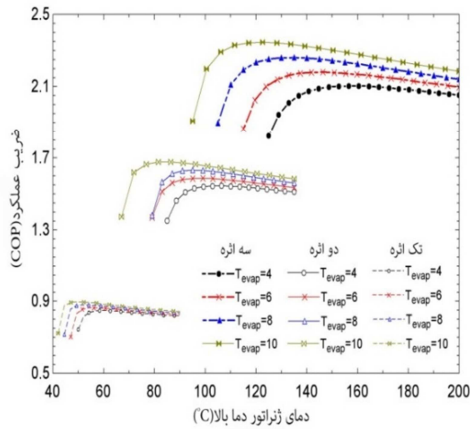
$$\sum m_i - \sum m_o = 0 \quad (۱)$$

$$\sum m_i \cdot x_i - \sum m_o \cdot x_o = 0 \quad (۲)$$

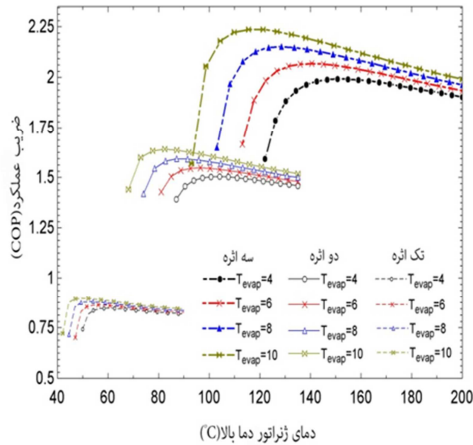
که  $m$  شار جریان جرم و  $x$  کسر جرمی لیتیم بروماید در محلول است.

<sup>۱</sup> Enthalpy

سه اثره با هم حل شده‌اند. خواص نقاط مختلف سیستم و میزان کار و گرمای مبادله شده توسط اجزای مختلف سیستم با استفاده از کد کامپیوتری نوشته شده در برنامه Engineering Equation Solver (EES) به دست آمده است. با استفاده از خواص ترمودینامیکی، ضریب عملکرد و بازده اگزرژی سیستم تبرید جذبی تک اثره، دو اثره و سه اثره برای شرایط کاری مختلف و تغییرات خواص ترمودینامیکی با دیگر متغیرهای سیستم محاسبه شده‌اند. تغییرات ضریب عملکرد سیستم-های تبرید جذبی سه اثره جریان سری و جریان موازی با تغییرات دمای ژنراتور در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. مقادیر ضریب عملکرد بالا در دماهای ژنراتور پایین و تبخیرکننده بالا به دست آمده‌اند.



شکل ۳- تغییرات ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی موازی با تغییرات دمای ژنراتور



شکل ۴- تغییرات ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی سری با تغییرات دمای ژنراتور

برای یک دمای تبخیرکننده داده شده یک دمای ژنراتور کمینه برای ضریب عملکرد بیشینه وجود دارد. در این مطالعه و هنگامی که دمای تبخیر از ۴ تا ۱۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند مقادیر ضریب عملکرد برای سیستم تک اثره در محدوده ۰/۸۹۶-۰/۸۴۷ و برای سیستم دو اثره سری در محدوده ۱/۶۴-۱/۵ و برای سیستم دو اثره

ژنراتور دما بالا:

$$Q_{gen} = m_{24} h_{24} + m_{27} h_{27} - m_{23} h_{23} \quad (21)$$

ژنراتور دما متوسط:

$$Q_{mtg} = m_{21} h_{21} + m_{14} h_{14} + m_{17} h_{17} - m_{26} h_{26} - m_{13} h_{13} \quad (22)$$

ژنراتور دما پایین:

$$Q_{ltg} = m_4 h_4 + m_7 h_7 + m_{11} h_{11} - m_3 h_3 - m_{16} h_{16} \quad (23)$$

چگالنده دما بالا:

$$Q_{htc} = m_{27} h_{27} - m_{28} h_{28} \quad (24)$$

چگالنده دما پایین:

$$Q_{mtc} = m_{17} h_{17} + m_{29} h_{29} - m_{18} h_{18} \quad (25)$$

پمپ فشار پایین:

$$W_{pl} = m_1 \cdot v_1 \cdot (P_m - P_1) \quad (26)$$

پمپ فشار متوسط:

$$W_{pm} = m_{11} \cdot v_{11} \cdot (P_h - P_m) \quad (27)$$

پمپ فشار پایین:

$$W_{ph} = m_{21} \cdot v_{21} \cdot (P_{hh} - P_h) \quad (28)$$

کارایی مبادله‌کن‌های گرما:

$$\varepsilon_{hxx} = (T_{24} - T_{25}) / (T_{24} - T_{22}) \quad (29)$$

$$\varepsilon_{mxx} = (T_{14} - T_{15}) / (T_{14} - T_{12}) \quad (30)$$

$$\varepsilon_{lxx} = (T_4 - T_5) / (T_4 - T_2) \quad (31)$$

ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$COP = Q_{evap} / (Q_{gen} + W_{pump}) \quad (32)$$

### ۳-۳- قانون دوم

در حالت جریان یکنواخت و صرف نظر از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل معادله‌ی موازنه‌ی اگزرژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\psi_{destroyed} = \sum (1 - T_0 / T_j) \cdot Q_j + (\sum m_i \psi_i)_{in} - (\sum m_i \psi_i)_{out} - W \quad (33)$$

که  $\psi$  اگزرژی مخصوص،  $T_0$  دمای مرجع،  $T_j$  دمای منبع گرما و  $\psi_{destroyed}$  انهدام اگزرژی به علت بازگشت ناپذیری‌های داخلی است. بازده اگزرژی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \Delta\psi_{in} / \Delta\psi_{out} \quad (34)$$

که تغییرات اگزرژی تبخیرکننده و ژنراتور به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

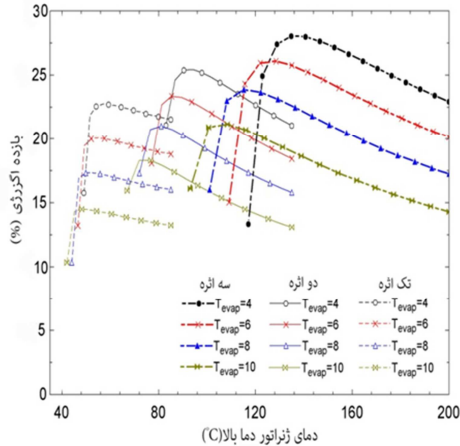
$$\Delta\psi_{in} = [\dot{m}(\psi_e - \psi_i)]_{chilled\ water} \quad (35)$$

$$\Delta\psi_{out} = [\dot{m}(\psi_i - \psi_e)]_{steam/hot\ water} + W_{pump} \quad (36)$$

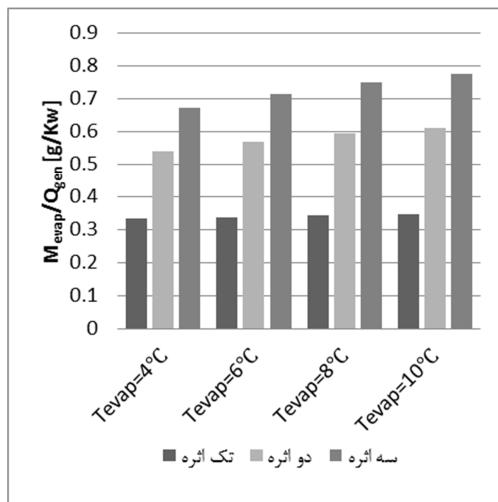
### ۴- نتایج

معادلات موازنه‌ی جرم، انرژی و اگزرژی و همچنین سایر روابط حاکم برای شبیه سازی مدل سیستم تبرید جذبی تک اثره، دو اثره و

با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که میزان میرد تولید شده نسبت به گرمای ورودی در سیستم سه اثره بیشتر از دو اثره و در دو اثره بیشتر از تک اثره می‌باشد. علت این افزایش وجود ژنراتورهای اضافی در سیستم‌های با مرتبه بالاتر است که این باعث تولید میرد اضافی در هر مرحله می‌شود.



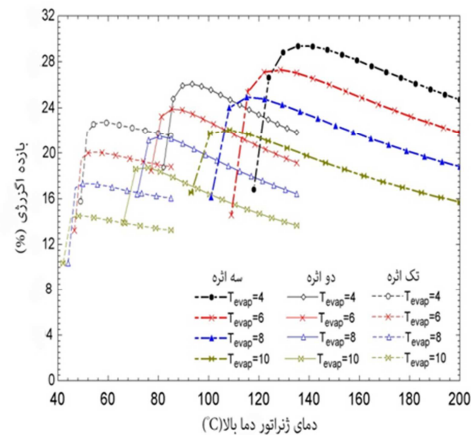
شکل ۶- تغییرات بازده اگزرژی سیستم تبرید جذبی سری با تغییرات دمای ژنراتور



شکل ۷- نرخ میرد تولید شده به گرمای داده شده در ژنراتور در سیستم تبرید جذبی جریان سری

موازی در محدوده ۱/۵۵-۱/۶۸ و برای سیستم سه اثره سری در محدوده ۱/۹۹-۲/۲۴ و برای سیستم سه اثره موازی در محدوده ۲/۳۴-۲/۱ می‌باشد.

نتایج شکل‌های (۳) و (۴) حاکی از آن است که ضریب عملکرد سیستم دو اثره تقریباً دو برابر سیستم تک اثره و سیستم سه اثره اندکی کمتر از سه برابر سیستم تک اثره می‌باشد. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که ضریب عملکرد سیستم‌های موازی اندکی بیشتر از سیستم‌های سری می‌باشد. در دماهای مختلف تبخیرکننده با افزایش دمای ژنراتور ابتدا ضریب عملکرد افزایش و سپس با افزایش دما اندکی کاهش می‌یابد. تغییرات بازده اگزرژی سیستم‌های تبرید جذبی جریان سری و جریان موازی با تغییرات دمای ژنراتور در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. بازده اگزرژی نیز همانند ضریب عملکرد ابتدا افزایش و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه در یک دمای خاص ژنراتور شروع به

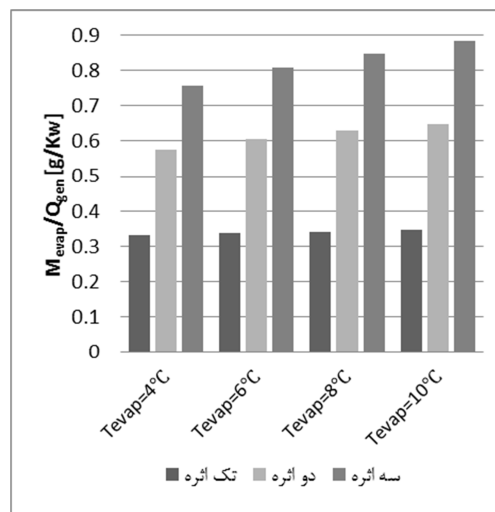


شکل ۵- تغییرات بازده اگزرژی سیستم تبرید جذبی موازی با تغییرات دمای ژنراتور

کاهش می‌کند و با افزایش دمای ژنراتور کاهش می‌یابد. با مشاهده شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که بازده اگزرژی سیستم‌های تبرید جذبی دو اثره بیشتر از تک اثره و بازده سیستم‌های سه اثره بیشتر از دو اثره می‌باشد. در این مطالعه هنگامی که دمای تبخیرکننده از ۴ تا ۱۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند مقادیر بازده اگزرژی برای سیستم تک اثره در محدوده ۲۲/۷۴-۱۴/۵ و برای سیستم دو اثره سری در محدوده ۲۵/۴۴-۱۵/۸۱ و دو اثره موازی در محدوده ۲۶/۱-۱۸/۷ و سه اثره سری در محدوده ۲۸/۰۸-۲۱/۲ و سه اثره موازی در محدوده ۲۹/۴-۲۲/۱ درصد می‌باشد. با افزایش دمای ژنراتور با این که ثابت است دمای ژنراتور که در مخرج رابطه اگزرژی برای ژنراتور قرار دارد افزایش می‌یابد و در نتیجه تغییرات اگزرژی ژنراتور افزایش می‌یابد و چون تغییرات اگزرژی ژنراتور در فرمول بازده اگزرژی در مخرج قرار دارد بازده اگزرژی کاهش می‌یابد.

معادله اگزرژی برای ژنراتور در رابطه (۳۷) نشان داده شده است. در این رابطه T نشان دهنده دمای بخار در حال چگالش می‌باشد.

$$\Delta\psi_{gen} = Q_{gen} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (37)$$



شکل ۸- نرخ مبرد تولید شده به گرمای داده شده در ژنراتور در سیستم تبرید جذبی جریان موازی

### ۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم تبرید جذبی تک اثره، دو اثره و سه اثره بررسی شده است. ضریب عملکرد، بازده اگزرژی و نرخ جریان جرم بخار مبرد تولید شده به گرمای ورودی برای هر سه سیستم در شرایط کاری مختلف به وسیله مدل‌های ریاضی استخراج شده به دست آمده‌اند.

- این مطالعه نشان می‌دهد ضریب عملکرد سیستم سه اثره تقریباً ۳۵ درصد بیشتر از سیستم دو اثره است اما بازده اگزرژی سیستم سه اثره نسبت به بازده اگزرژی دو اثره ۱۰ الی ۱۸ درصد افزایش می‌یابد.
  - همچنین ضریب عملکرد سیستم دو اثره دو برابر سیستم تک اثره است و بازده اگزرژی سیستم دو اثره نسبت به بازده اگزرژی تک اثره ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.
  - نتایج نشان می‌دهند که ضریب عملکرد و بازده اگزرژی سیستم با افزایش دمای ژنراتور به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس کاهش می‌یابد.
  - نتایج حاکی از آن است که با افزایش دمای تبخیر کننده مقدار ضریب عملکرد سیستم افزایش می‌یابد و مقدار بازده اگزرژی سیستم کاهش می‌یابد.
  - سیستم سه اثره بخار مبرد بیشتری نسبت به سیستم‌های تک اثره و دو اثره تولید می‌کند. این اثر رابطه مستقیم با تعداد ژنراتورهای مورد استفاده در سیستم دارد.
  - برای هر دمای تبخیر کننده یک دمای ژنراتور بهینه وجود دارد که در این نقطه ضریب عملکرد و بازده اگزرژی سیستم بیشینه است.
- بررسی سیستم‌های تبرید جذبی از لحاظ اقتصادی و همچنین مقایسه این سیستم‌ها با سیستم‌های تبرید جذبی آب-آمونیاک می‌تواند گزینه‌های مناسبی برای ادامه این پژوهش باشند.

### ۶- نمادها

v	حجم مخصوص (m <sup>3</sup> /kg)
w	کار (J)
ε	کارایی
x	کسر جرمی محلول
COP	ضریب عملکرد
ψ	اگزرژی مخصوص (KJ/Kg)
E	بازده اگزرجتیکی
h	آنتالپی مخصوص (KJ/Kg)
Q	گرما (J)
P	فشار (kPa)
T	دما (K)
m	جرم (Kg)
cond	چگالنده
abs	جاذب
gen	ژنراتور
evap	تبخیر کننده
ltg	ژنراتور فشار پایین
mtg	ژنراتور فشار متوسط
htc	چگالنده فشار بالا
mtc	چگالنده فشار متوسط
hhx	مبادله کن گرمای فشار بالا
mhx	مبادله کن گرمای فشار متوسط
lhx	مبادله کن گرمای فشار پایین
pl	پمپ فشار پایین
pm	پمپ فشار متوسط
ph	پمپ فشار بالا

### ۷- مراجع

- [1] Kaushik SC, Arora A, Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems. International Journal of Refrigeration; 32(6): 1247-58, 2009.
- [2] Ziegler F, Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems. Int J Therm Sci; 38: 191-208, 1999.
- [3] Kang YT, Kunugi Y, Kashiwagi T, Review of advanced absorption cycles: Performance improvement and temperature lift enhancement. Int. J Refrig; 23: 388-401, 2000.
- [4] Alefeld G, and Radermacher R, Heat Conversion Systems, Boca raton, CRC press, 1994.
- [5] Aphornratana S and Eames, IW, Thermodynamic Analysis of Absorption Refrigeration Cycles Using the Second Law of Thermodynamic Method, International Journal of Refrigeration, Vol. 18, .pp.244-252, 1995.
- [6] Aphornratana S and Sriveerakul, T, Experimental Studies of Single Effect Absorption Refrigerator Using Aqueous Lithium Bromide Effect of Operating Condition to System Performance, International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science ,Vol. 32, , pp.658-669, 2007.

- [7] Arora A and Kaushik S C, Theoretical Analysis of LiBr/H<sub>2</sub>O Absorption Refrigeration Systems, International Journal of Energy Research, DOI:10.1002/er.1542, 2009.
- [8] Chua HT, Toh, HK, Malek A and Sirinivasan K, A General Thermodynamic for Understanding the Behavior of a Absorption Chillers, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, pp. 491-507, 2002.
- [9] Manole DM, Lage JL, Thermodynamic optimization method of a triple-effect absorption system with wasted heat recovery Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 38, No. 4, pp. 655-663, 1995.
- [10] Rabah Gomri, Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems” Energy Conversion and Management 51, pp.1629–1636, 2010.
- [11] Anand DK, Lindler KW, Schweitzer S, Kennish W, Second-law analysis of solar powered absorption cooling cycles and systems. Journal of Solar Energy Engineering; 1984.
- [12] Koehler WJ, Ibele WE, Soltes J, Winter ER. Availability simulation of a lithium bromide absorption heat pump. Heat Recovery Systems and CHP; 8(2):157–71, 1988.
- [13] Goff P, Louis G, Ramadane A. pompes a chaleura absorption, multi-etagees:analyse exergetique. principes de realisation [Multi-stage absorption heatpumps: exergetic analysis. Techniques for construction], Revue Generale deThermique; 27(320–321):451–63, 1988.
- [14] Ataer EO, Go gus Y, Comparative study of irreversibilities in an aqua–ammonia absorption refrigeration system. International Journal of Refrigeration; 14(2): pp.86–92, 1991.
- [15] Best R, Islas J, Martinez M. Exergy efficiency of an ammonia–water absorption system for ice production. Applied Energy 1993; pp.45:241–56.
- [16] Lee FS, Sherif SA. Thermodynamic analysis of a lithium bromide/water absorption system for cooling and heating applications. Int J Energy Res; 25:1019–31, 2001.
- [17] Sencan A, Yakut KA, Kaligirou SA. Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems. Renew Energy; 30:645–57, 2005.
- [18] Jeong J, Saito K, and Sunao K. Optimum design method for a single effect absorption refrigerator based on the first and, second law analysis. In: 21st IIR international congress of refrigeration, Washington, DC (USA): 2003; 1–9.
- [19] Gebresslassie BH, Medrano M, Boer D. Exergy analysis of multi-effect water–LiBr absorption systems: From half to triple effect. Renewable Energy 35, pp. 1773–1782, 2010.
- [20] Borge-Diez D, Colmenar-Santos A, Pérez-Molina C, Castro-Gil M. Experimental validation of a fully solar-driven triple-state absorption system in small residential buildings. Energy Build 2012; 55:227–37.
- [21] Yılmaz İH, Saka K, Kaynaklı O, thermodynamic evaluation on high pressure condenser of double effect absorption refrigeration system. Energy; 113:1031–41, 2016.
- [22] Ghazani MA, Hashem-ol-Hosseini A, Emami MD., A comprehensive analysis of a laboratory scale counter flow wet cooling tower using the first and the second laws of thermodynamics.” Applied Thermal Engineering.125:1389–401, 2017.
- [23] Razmi A, Soltani M, Kashkooli FM, Farshi LG., Energy and exergy analysis of an environmentally-friendly hybrid absorption/recompression refrigeration system. Energy Conversion and Management.164: pp.59-69, 2018.