

بهینه‌سازی چند هدفه سیستم‌های تبرید جذبی با زوج آب - مایع یونی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

فواد نوری

محرّم جعفری*

مرتضی یاری

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

عملکرد چرخه تبرید جذبی علاوه بر پیکربندی و موقعیت اجزای آن، به خواص ترمودینامیکی مخلوط آن نیز بستگی دارد. سیستم‌های جذبی متداول از مخلوط‌های آب - لیتیوم بروماید و آمونیاک - آب استفاده می‌نمایند. بدلیل مشکلات ناشی از استفاده این مخلوط‌ها، محقق‌ها مایعات یونی را به عنوان جاذب جدید مبردها پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق، عملکرد سیستم تبرید جذبی با دو مایع یونی مختلف از لحاظ ترمودینامیکی و اقتصادی بررسی شده و با سیستم آب - لیتیوم بروماید مقایسه شده است. روش بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه کردن سیستم استفاده شده است. خصوصیات ترمودینامیکی مخلوط‌ها توسط مدل غیرتصادفی دو مایع محاسبه شده‌اند. ضریب عملکرد، بازده انرژی و نرخ هزینه محصول پارامترهای هستند که بعنوان توابع هدف انتخاب شده‌اند، مقادیر بهینه توابع هدف و متغیرهای طراحی بدست آمده و با مقادیر اولیه مقایسه شده‌اند. در میان مخلوط‌های شامل مایع یونی، بالاترین ضریب عملکرد و بازده انرژی و کمترین نرخ هزینه محصول برای زوج آب - ۱- اتیل، ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو استیت بدست آمده است. **واژه‌های کلیدی:** مایع یونی، چرخه تبرید جذبی، بهینه سازی چند هدفه، ترموآکونومیک.

Multi-objective Optimization of Ionic Liquid Absorption Refrigeration Cycles using Genetic Algorithm

F. Noori

M. Jafari

M. Yari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The performance of refrigeration cycle depends not only on their configuration, but also on thermodynamic properties of working pair. Typical absorption systems use refrigerant/absorbent combinations of lithium bromide-water and water-ammonia. Because of difficulties in using these combinations, researchers proposed Ionic Liquids as novel alternative absorbent of refrigerant which can be used in absorption refrigeration cycles. In this study, the performance of the absorption refrigeration system with two different ionic liquids, thermodynamically and economically investigated and compared with the water-lithium bromide system. Multi-objective optimization using genetic algorithm is carried out for optimization of cycle. The thermodynamic properties of mixtures as the working fluid pair are predicted using Non-Random Two Liquids model. The coefficient of performance, exergetic efficiency and product cost flow rate are the parameters which were selected as objective functions. The optimal values of objective functions and design parameters were found and compared to the initial values. Among the combinations include ionic liquids, the highest coefficient of performance and exergetic efficiency and minimum product cost flow rate are obtained for the water-1-ethyl-3-methylimidazolium trifluoroacetate combination.

Keywords: Ionic liquid, Absorption refrigeration cycle, Multi-objective Optimization, Thermoeconomic.

۱- مقدمه

می‌باشند. استفاده از این مخلوط‌ها در سیستم‌های جذبی دارای مشکلاتی هستند که می‌توان به تبلور و خوردگی در سیستم آب - لیتیوم بروماید و عملکرد پایین سیستم، نیاز به رکتیفایر به منظور جداسازی مبرد^۲ از جاذب و نیاز به منبع گرمایی دما بالا در سیستم آمونیاک - آب اشاره کرد [۲]. بعضی از مشکلات ذکر شده در این سیستم‌ها می‌توانند توسط استفاده از مایعات یونی^۳ به عنوان جاذب در آنها برطرف گردند. مایعات یونی دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مطلوبی مانند حلالیت بالا برای بسیاری از مواد آلی و معدنی، اشتعال-پذیری پایین، دمای ذوب پایین، فشار بخار پایین، پایداری حرارتی بالا

سیستم‌های تبرید تراکمی که بر اساس فشرده‌سازی بخار عمل می‌کنند، انرژی مورد نیاز خود را به صورت الکتریسیته دریافت می‌کنند و سیال عامل‌های استفاده شده در آنها توسط قوانین بین المللی تا حدودی محدود شده است [۱]. چرخه‌های جذبی سیستم‌هایی هستند که انرژی مورد نیاز خود را به جای الکتریسیته از منابع گرمایی دریافت می‌کنند. مخلوط‌هایی که در سیستم‌های جذبی به عنوان سیال عامل استفاده می‌شوند بیشتر شامل آب - لیتیوم بروماید و آمونیاک - آب می‌باشند که در زوج اول و دوم به ترتیب لیتیوم بروماید و آب جاذب^۱

^۲. Refrigerant

^۳. Ionic Liquids

^۱. Absorbent

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mjafari@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۲۸

و داشتن فاز مایع در گستره وسیعی از دما می‌باشند [۳]. این خصوصیات مطلوب، باعث استفاده از مایعات یونی به عنوان حلالهای آلی سبز در بسیاری از صنایع شده است. همچنین مایعات یونی می‌توانند مشکلاتی مانند تبلور را در چرخه‌های آب - لیتیوم بروماید برطرف کنند [۴]. با توجه به خصوصیات مطلوب ذکر شده، این مایع‌ها می‌توانند به عنوان نوع جدیدی از جاذب در چرخه‌های تبرید جذبی استفاده گردند. به تازگی محققان در حال جستجو برای یافتن مایعات یونی مناسبی هستند که بتوانند جاذب‌های مطلوبی برای مبردهای متداول استفاده شده در سیستم‌های جذبی باشند [۵].

بررسی عملکرد سیستم جذبی با زوج آب و ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم دی متیل فسفات^۱ و مقایسه آن با سیستم آب - لیتیوم بروماید تحت شرایط یکسان توسط ژانگ و هو [۶] انجام شده است. آنها در تحقیق خود بیان کرده‌اند که ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی با استفاده از مایع یونی کمتر از سیستم آب - لیتیوم بروماید می‌باشد. عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه تبرید جذبی با زوج آب و ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم دی متیل فسفات + متانول توسط لیانگ و همکاران [۷] بررسی شده و ضریب عملکرد برابر با ۰/۸۲ بدست آمده است. مقدار ضریب عملکرد سیستم جذبی با استفاده از این مخلوط به ترتیب کمتر و بیشتر از ضریب عملکرد سیستم‌های آب - لیتیوم بروماید و آمونیاک - آب بدست آمده است. کیم و همکاران [۸] عملکرد مخلوط مایع یونی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم هگزا فلورو فسفات^۲ و مبردهای دی فلورو متان^۳، ۲،۱،۱،۱- تترا فلورو اتان^۴ و ۱،۱- دی فلورو اتان^۵ را به عنوان زوج‌های جدید در سیستم‌های تبرید جذبی مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها برای پیش‌بینی حلالیت و خصوصیات مخلوط مانند آنتالپی و آنتروپی، از مدل غیرتصادفی دو مایع^۶ استفاده کرده‌اند. در این تحلیل زوج دارای مبرد دی فلورو متان دارای بالاترین ضریب عملکرد بوده است. در یک تحقیق دیگر توسط کیم و همکاران [۹] خواص ترموفیزیکی مخلوط آب - ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترا فلورو بریت^۷ محاسبه شده و عملکرد آن با سیستم‌های متداول مقایسه شده است. ظرفیت گرمایی، چگالی و فشار بخار مخلوط آب - ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم اتیل سولفات^۸ به عنوان یک زوج سیال عامل در سیستم تبرید جذبی توسط ژانگ و همکاران محاسبه شده است [۱۰]. خصوصیات مانند آنتالپی مازاد^۹ برخی از مایعات یونی مانند ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترا فلورو بریت توسط یوکوزوکی و شیفلت با استفاده از معادله حالت تعیین شده است [۱۱]. ظرفیت گرمایی و آنتالپی مازاد مخلوط آب و سه مایع یونی مختلف شامل ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم اتیل سولفات^{۱۰}، ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو متان سولفونیت^{۱۱} و ۱- اتیل ۳- متیل

ایمیدازولیوم تری فلورو استیت^{۱۲} توسط فیکه و همکاران [۱۲] تعیین گردیده است. همچنین خصوصیات ترمودینامیکی زوج آب و مایعات یونی بر پایه متیل سولفات توسط ابومندور و همکاران [۱۳] اندازه‌گیری شده و عملکرد سیستم جذبی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. کیم و گونزالس عملکرد سیستم تبرید جذبی با مایع یونی را به طور نظری با استفاده از آنالیز انرژی بررسی کرده‌اند [۱۴]. در کار آنها، ترکیب‌های مختلف مبرد و مایعات یونی به عنوان زوج سیال مایع انتخاب شده‌اند و از روش غیرتصادفی دو مایع برای پیش‌بینی حلالیت مخلوط و خصوصیات ترمودینامیکی استفاده شده است. چن و همکاران [۱۵] در یک تحقیق عددی عملکرد ترمودینامیکی تبدیل‌کننده‌های حرارتی جذبی با مخلوط‌های آب - [mmim]DMP و CH₃OH - [mmim]DMP را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که عملکرد آنها کمی پایینتر از سیستم آب - لیتیوم بروماید می‌باشند. در این تحقیق همچنین تغییرات تلفات انرژی با تغییر دمای جاذب، ژنراتور و اواپراتور تحلیل شده است. برای سیستم‌های آب - [mmim]DMP و آب - لیتیوم بروماید بیشترین تلفات انرژی در ژنراتور و اواپراتور بوده و برای سیستم CH₃OH - [mmim]DMP بزرگترین تلفات انرژی در ژنراتور و جاذب بوده است. مطالعات یوکوزوکی و همکاران [۱۶] و [۱۷] در مورد استفاده از مایعات یونی به عنوان جاذب مبرد آمونیاک در چرخه جذبی نشان می‌دهد که استفاده از دی متیل اتانول آمونیوم استیت^{۱۳} به عنوان جاذب در چرخه‌های جذبی بهترین عملکرد را دارا می‌باشد، بصورتی که ضریب عملکرد آن مقداری کمتر از سیستم آمونیاک - آب بدست آمده است. چن و همکاران [۱۸]، در یک تحقیق تجربی عملکرد یک سیستم تبرید جذبی با مخلوط آمونیاک و مایعات یونی مختلف را شبیه سازی کرده و با عملکرد سیستم آمونیاک - آب مقایسه کرده‌اند. آنها نتیجه گرفته‌اند که عملکرد سیستم آمونیاک - [emim]Cu₂Cl₅ از همه سیستم‌های دیگر بالاتر بوده است. سوچاتها و ونکاتاراتنام [۱۹] در یک مطالعه عددی، عملکرد یک تبدیل‌کننده حرارتی جذبی تک اثره با مایعات یونی به عنوان جاذب و آمونیاک به عنوان مبرد را بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعه نشان داده است که مخلوط مایعات یونی و آمونیاک می‌توانند به عنوان یک جایگزین مناسب در نظر گرفته شود. یو و همکاران [۲۰]، تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم تبرید جذبی با مایعات یونی شامل، [emim][BF₄]، [omim][BF₄]، [hmim][BF₄] و [hmim][Tf₂N] و مبرد R1234ze(E) را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است که سیستم دارای [BF₄] [emim] همیشه کمترین ضریب عملکرد و بازده انرژی را دارد، در حالی که سیستم دارای [Tf₂N] [hmim] بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. تحقیقات انجام شده بر روی بهینه‌سازی سیستم‌های جذبی، عمدتاً به چرخه‌های با زوج‌های متداول آب - لیتیوم بروماید و آمونیاک - آب محدود می‌باشند [۲۱-۲۳]. مطالعات انجام شده بر روی سیستم‌های تبرید جذبی که از مایعات یونی به عنوان جاذب استفاده می‌نمایند نشان می‌دهد که هر چند این سیستم‌ها مشکلات استفاده از سیال‌عامل‌های متداول را برطرف می‌نمایند اما دارای ضریب عملکرد نسبتاً پایینی می‌باشند [۲۴].

¹² 1-ethyl-3-methylimidazolium trifluoroacetate ([EMIM][TFA])

¹³ N,N-dimethylethanolammonium acetate ([DMEA][Ac])

¹ 1-ethyl-3-methylimidazoliumdimethylphosphate ([MMIM][DMP])

² 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ([BMIM][PF₆])

³ Difluoromethane (R32)

⁴ 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R134a)

⁵ 1,1-Difluoroethane (R152a)

⁶ Non-Random Two-Liquid (NRTL)

⁷ 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ([EMIM][BF₄])

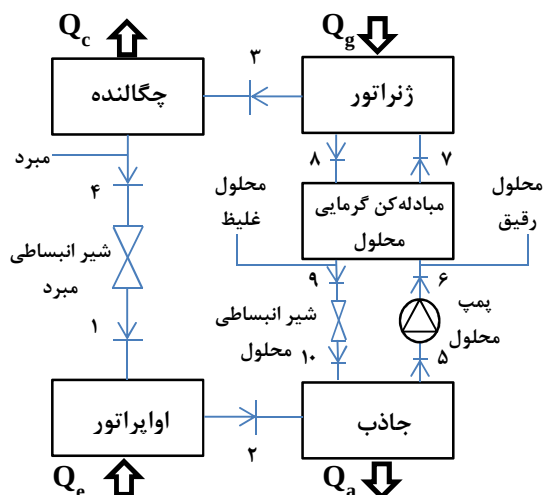
⁸ 1-ethyl-3-methylimidazolium ethyl sulfate (EMISE)

⁹ Excess Enthalpy

¹⁰ 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate ([EMIM][ETSO₄])

¹¹ 1-ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate

([EMIM][OTf])



شکل ۱- طرحواره‌ای یک چرخه تبرید جذبی

- از افت فشار در تمامی فرآیندها بجز در حالت عبور جریان از شیرهای انبساطی صرف نظر می‌شود.
- مبرد خروجی از ژنراتور و جاذب در حالت اشباع فرض می‌شود و دمای محلول در خروج از آنها به ترتیب برابر با دمای ژنراتور و جاذب می‌باشد.
- فرایند انبساط در شیرهای انبساطی بصورت آنتالپی ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- مدل‌سازی سیستم تبرید بر اساس ظرفیت سرماسازی ۱ kW انجام گرفته است.

به منظور مقایسه، مدل با استفاده از پارامترهای ورودی که در مورد چرخه آب - لیتیوم بروماید توسط گومری [۲۷] مورد استفاده قرار گرفته است، شبیه‌سازی شده است (جدول ۱).

۳- روش غیر تصادفی دو مایع

در این تحقیق از مدل غیرتصادفی دو مایع جهت بدست آوردن خصوصیات مخلوط آب-مایع یونی استفاده شده است. مدل غیرتصادفی غیرتصادفی دو مایع یک معادله تجربی است که توسط رنون و پراسنیتز

جدول ۱ - مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

پارامتر	مقدار
ظرفیت تبرید (kW)	۱
دمای ژنراتور $T_g(^{\circ}\text{C})$	۸۵
دمای اوپراتور $T_e(^{\circ}\text{C})$	۴
دمای چگالنده $T_c(^{\circ}\text{C})$	۳۳
دمای جاذب $T_a(^{\circ}\text{C})$	۳۳
دماهای ورودی و خروجی آب خنک کننده جاذب $(^{\circ}\text{C})$	T_{a-8}, T_{a-3}
دماهای ورودی و خروجی آب خنک کننده چگالنده $(^{\circ}\text{C})$	T_{c-8}, T_{c-3}
دماهای ورودی و خروجی آب سرد شونده اوپراتور $(^{\circ}\text{C})$	T_{e+3}, T_{e+8}
دمای بخار آب ورودی به ژنراتور $(^{\circ}\text{C})$	T_g+18
کارایی مبادله کن گرمایی محلول (%)	۷۰
بازده پمپ محلول (%)	۹۵

هدف از تحقیق حاضر مطالعه عملکرد سیستم‌های تبرید جذبی با مخلوط آب به عنوان مبرد و مایعات یونی شامل ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو متان سولفونیت و ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو استیت به عنوان جاذب و مقایسه آن با چرخه آب - لیتیوم بروماید و همچنین یافتن جبهه‌های پارتو حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد. خصوصیات ترمودینامیکی مخلوط‌ها شامل آنتالپی و آنتروپی مخلوط با استفاده از روش مدل غیرتصادفی دو مایع بدست آمده‌اند و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای یافتن متغیرهای طراحی بهینه شامل دماهای ژنراتور، چگالنده، اوپراتور و جاذب استفاده شده است. در این بهینه‌سازی ضریب عملکرد، بازده انرژی و نرخ هزینه محصول به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. متغیرهای طراحی به همراه مقادیر توابع هدف بهینه سیستم محاسبه شده و با مقادیر اولیه مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه در منابع تحقیقاتی گذشته برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت مخلوط آب و مایعات یونی در ژنراتور، جاذب و مبادله کن گرمایی سیستم‌های تبرید جذبی فرمول‌های تجربی و یا تحلیلی ارائه نشده است، رابطه‌هایی برای محاسبه ضرایب انتقال گرما با الگو از روابط مربوط به مخلوط آب و لیتیوم بروماید [۲۵ و ۲۶]، برای اولین بار در این تحقیق ارائه گردیده است که از جمله نوآوری‌های پژوهش می‌باشد. در این تحقیق، مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم بوسیله نرم‌افزار مطلب^۱ انجام شده است. در ادامه به شرح عملکرد سیستم، روش غیر تصادفی دو مایع، تحلیل ترمودینامیکی و ترموکانومیکی و الگوریتم ژنتیک پرداخته شده و سپس تحلیل نتایج بدست آمده ارائه گردیده است.

۲- شرح عملکرد سیستم

اجزای اصلی یک چرخه تبرید جذبی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانند سیستم‌های تبرید تراکمی بخار، در اینجا نیز مبرد با فشار و دمای بالا وارد چگالنده شده و در آن چگالیده می‌شود. سپس با عبور از یک شیر انبساطی فشار و دمای آن کاهش یافته و وارد اوپراتور خواهد شد که در آن با تبخیر مبرد سرمایش مورد نیاز تولید می‌گردد. بخار مبرد خروجی از اوپراتور توسط محلول غلیظ جاذب جذب شده و محلول رقیق حاصل شده از طریق پمپ محلول به ژنراتور در فشار بالا پمپاژ می‌شود. قابل ذکر است که محلول رقیق از طریق یک مبادله کن گرمایی، با استخراج گرما از محلول غلیظ خروجی از ژنراتور، پیش گرم می‌شود. با دادن حرارت از منبع گرمای خارجی به محلول موجود در ژنراتور بخار مبرد از محلول جدا شده و به چگالنده جریان می‌یابد. محلول غلیظ ژنراتور را در دمای بالا ترک کرده و دمای آن از طریق تبادل حرارت با محلول رقیق در مبادله کن گرمایی کاهش می‌یابد سپس از طریق یک شیر انبساطی وارد جاذب شده و چرخه کامل می‌گردد.

به منظور ساده‌سازی در تحلیل سیستم‌های تبرید جذبی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- مدل‌سازی چرخه تبرید جذبی در شرایط پایا انجام شده است.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.

^۱.MATLAB

[۲۸] بر اساس تئوری انرژی مازاد گیبس بیان شده است. عبارت انرژی مازاد گیبس در این روش از رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۴]:

$$G^E = x_1 x_2 \left[\frac{\tau_{21} G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} + \frac{\tau_{12} G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right] \quad (1)$$

که در آن پارامترهای G_{21} و G_{12} ، پارامترهای کنش دوگانه قابل تنظیم از رابطه (۲) بدست می‌آید [۲۸]:

$$\begin{aligned} G_{12} &= \exp(-\alpha_{12} \tau_{12}) \\ G_{21} &= \exp(-\alpha_{21} \tau_{21}) \end{aligned} \quad (2)$$

ضریب فعالیت (γ) برای جزء های ۱ و ۲ در مخلوط دوتایی را می‌توان از رابطه‌های (۳) و (۴) نشان داد [۲۸]:

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left[\tau_{21} \left(\frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right)^2 + \frac{G_{12} \tau_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} \right] \quad (3)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right)^2 + \frac{G_{21} \tau_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} \right] \quad (4)$$

از آنجایی که غلظت مایع یونی در فاز بخار ناچیز می‌باشد، ضریب فعالیت (γ_1) را می‌توان به صورت $\gamma_1 = P/x_1 P_1^s$ نوشت [۲۹]:

که در آن p_1^s فشار بخار اشباع آب و p فشار بخار مخلوط می‌باشند.

آنتالپی مازاد که نشان دهنده وابستگی انرژی گیبس و ضریب فعالیت (γ) به دما است، بر اساس رابطه گیبس و هلمهولتز از رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{\partial(G^E/T)}{\partial T} \right)_{P,x} = -\frac{H^E}{T^2} \quad (5)$$

آنتالپی مخلوط آب - مایع یونی را می‌توان بصورت زیر بیان کرد [۱۴]:

$$h = x_1 h_1 + x_2 h_2 + H^E \quad (6)$$

در رابطه (۶) x_1 ، x_2 ، h_1 و h_2 به ترتیب کسر مولی آب، کسر مولی یونی، آنتالپی آب خالص و آنتالپی مایع یونی خالص می‌باشند که آنتالپی‌های آب و مایع یونی از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند [۱۴]:

$$h_1 = \int_{273}^T C_{p,H_2O} dT \quad (7)$$

$$h_2 = \int_{273}^T C_{p,EMIM(TFA)} dT \quad (8)$$

همچنین آنتروپی مخلوط آب - مایع یونی از رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۴]:

$$s = x_1 s_1 + x_2 s_2 + S^E \quad (9)$$

که در آن s_1 ، s_2 و S^E به ترتیب آنتروپی آب خالص، آنتروپی مایع یونی خالص و آنتروپی مازاد مخلوط می‌باشند که از رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) بدست می‌آیند [۱۴]:

$$s_1 = \int_{273}^T \frac{C_{p,H_2O}}{T} dT - R \ln x_1 \quad (10)$$

$$s_2 = \int_{273}^T \frac{C_{p,EMIM(TFA)}}{T} dT - R \ln x_2 \quad (11)$$

$$S^E = \frac{H^E - G^E}{T} \quad (12)$$

G^E نیز از رابطه (۱۳) تعریف می‌گردد:

$$G^E = RT(x_1 \ln \gamma_1 + x_2 \ln \gamma_2) \quad (13)$$

پارامترهای τ_{21} و τ_{12} برای مخلوط آب - مایع یونی و آب - لیتیم بروماید که در این تحقیق استفاده شده است به ترتیب بر اساس نتایج آزمایشگاهی تعادل بخار - مایع انجام شده توسط فیکه و همکاران [۳۰] و کایتا [۳۱] بدست آمده است. گرمای ویژه، رسانایی گرمایی، چگالی و ویسکوزیته مخلوط‌ها از تحقیقات انجام شده گذشته استخراج شده است [۳۲، ۳۳].

۴- تحلیل ترمودینامیکی

تحلیل ترمودینامیکی سیستم تبرید جذبی با اعمال قوانین اول و دوم ترمودینامیک بر اجزای سیستم انجام می‌گیرد. در سیستم تبرید جذبی، دو سیال (مبرد و جاذب) وجود دارد و ترکیب آنها در نقاط مختلف

متفاوت است. بنابراین، موازنه جرم باید برای دو جزء و کل جرم نوشته شود. معادلات بقای جرم برای یک سیستم پایا از معادلات (۱۴) و (۱۵) است:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (14)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_o x_o \quad (15)$$

که در آن $\dot{m}$ و x به ترتیب دبی جریان جرمی و کسر مولی جاذب در محلول می‌باشند.

با صرفنظر از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل معادله بقای انرژی در حالت پایا را می‌توان بصورت رابطه (۱۶) نوشت:

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_o h_o \quad (16)$$

ضریب عملکرد بصورت نسبت ظرفیت خنک کنندگی بر کل انرژی ورودی مورد نیاز سیستم تعریف شده و از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p} \quad (17)$$

نسبت جریان جرمی محلول (f) به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$f = w_s / (w_s - w_w) \quad (18)$$

که در آن w_s و w_w به ترتیب کسر جرمی ماده جاذب در محلول غلیظ و رقیق هستند.

بازده انرژی‌تکی یک سیستم بصورت نسبت انرژی محصول به انرژی سوخت بیان می‌شود و توسط رابطه (۱۹) بدست می‌آید:

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_f} \quad (19)$$

در غیاب اثرات الکتریکی، کشش سطحی، هسته‌ای و مغناطیسی و با صرفنظر از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل، انرژی کل را می‌توان بصورت مجموع انرژی فیزیکی و شیمیایی نوشت:

$$\dot{E} = \dot{E}^{Ph} + \dot{E}^{Ch} \quad (20)$$

انرژی فیزیکی برابر با کار قابل حصول در انتقال یک سیستم از حالت اولیه به حالتی که در تعادل مکانیکی و گرمایی با محیط است، می‌باشد و از رابطه (۲۱) بدست می‌آید [۲۱]:

$$\dot{E}^{Ph} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (21)$$

انرژی شیمیایی متناسب است با کار قابل حصول در انتقال سیستمی که در تعادل مکانیکی و حرارتی با محیط است به حالتی که پایدارترین ساختار را در تعادل با محیط داشته باشد. با صرفنظر از انرژی شیمیایی مایع یونی و لیتیم بروماید، انرژی شیمیایی جریان‌ها برای آب (مبرد) از رابطه (۲۲) بدست می‌آید [۲۱]:

$$\dot{E}_{H_2O}^{Ch} = \dot{m} \left(\frac{x_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right) e_{Ch,H_2O}^0 \quad (22)$$

که در آن x_{H_2O} و e_{Ch,H_2O}^0 به ترتیب کسر مولی آب و انرژی شیمیایی استاندارد آب می‌باشند.

موازنه انرژی در حالت پایا را می‌توان بصورت رابطه (۲۳) نوشت:

$$\dot{E}_{XQ} + \sum \dot{m}_i ex_i = \dot{E}_{XW} + \sum \dot{m}_o ex_o + \dot{E}_{XD} \quad (23)$$

در رابطه بالا $\dot{E}_{XQ}$ ، $\dot{E}_{XD}$ و $\dot{E}_{XW}$ به ترتیب میزان انرژی مربوط به قدرت مکانیکی، میزان انرژی مربوط به انتقال گرما و میزان تخریب انرژی می‌باشند. همچنین $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی است.

۵- تحلیل ترمواکونومیکی

ترمواکونومیک شاخه‌ای از علم مهندسی است که با ترکیب مفهوم انرژی و اقتصاد، اطلاعات مفیدی را فراهم می‌آورد که با تحلیل ترمودینامیکی یا اقتصادی قابل دستیابی نمی‌باشد. در این نوع تحلیل،

۶- الگوریتم ژنتیک

با توجه به توانایی الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی کارا و موثر، این روش در طول سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هولند [۳۷] در سال ۱۹۷۵ مفهوم الگوریتم ژنتیک را توسعه داد. این چنین الگوریتم‌های تکاملی که الهام گرفته از طبیعت هستند، متفاوت از سایر تکنیک‌های سنتی عمل می‌کنند. تفاوت اصلی در این است که الگوریتم ژنتیک به جای یک نقطه واحد با یک فضای جستجو سر و کار دارد [۳۸]. برخلاف بهینه‌سازی تک هدفه که نتیجه آن یک مقدار واحد می‌باشد، جواب بهینه‌سازی چند هدفه به صورت یک مجموعه جواب بهینه خواهد بود که به صورت جبهه پارتو شناخته می‌شود [۳۹]. جزئیات فرایند الگوریتم ژنتیک را می‌توان در تحقیقات انجام شده گذشته مشاهده کرد [۴۰].

۶-۱- پارامترهای ورودی و خروجی برای الگوریتم ژنتیک

نتایج بهینه‌سازی به پارامترهای ورودی بسیار حساس می‌باشند. در این تحقیق پارامترهای ورودی بصورت $67 < T_g < 105$ ، $4 < T_e < 10$ ، $33 < T_c < 39$ و $33 < T_a < 39$ در نظر گرفته شده اند. همچنین مقادیر جهش (P_m) و پیوند (P_c) که پارامترهای الگوریتم ژنتیک می‌باشند به ترتیب برابر با $0/1$ و $0/8$ در نظر گرفته می‌شوند. با این شرایط پارامترهای خروجی شامل ضریب عملکرد، بازده انرژی و نرخ هزینه محصول به عنوان توابع هدف با استفاده از بهینه سازی چند هدفی بهینه می‌شوند.

۷- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی، نتایج مدل غیرتصادفی دو مایع برای مخلوط آب و مایع یونی ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو استیت با نتایج آزمایشگاهی فیکه و همکاران [۱۲] مقایسه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در تمام محدوده نسبت مولی، تطابق قابل قبولی بین نتایج کار حاضر و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. قابل ذکر است که در نسبت‌های مولی $0/1$ و $0/99$ بدلیل کوچک بودن مقادیر آنتالپی مازاد درصد خطای بیشتری را نسبت به نسبت‌های مولی دیگر شاهد هستیم. آنتروپی مخلوط آب - لیتیم بروماید توسط روش غیر تصادفی دو مایع محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی که توسط کایتا [۳۱] بدست آمده است مقایسه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به تطابق نتایج، می‌توان به درستی مقدار آنتروپی مخلوط آب - مایع یونی که توسط روش غیر تصادفی دو مایع در این تحلیل بدست آمده است اطمینان حاصل نمود.

هزینه‌ها برای هر جریان انرژی در ارتباط با جریان، کار و گرما در نظر گرفته شده است..

موازنه هزینه برای هر یک از اجزای سیستم به صورت رابطه (۲۴) نوشته شده است. این رابطه بیان می‌کند که مجموع هزینه‌های مربوط به جریان‌های انرژی خروجی برابر مجموع هزینه‌های مربوط به جریان‌های انرژی ورودی به همراه هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری و هزینه های عملیاتی و نگهداری ($\dot{Z}_k$) می‌باشد [۳۴]:

$$\sum \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{W,k} = \dot{C}_{Q,k} + \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{Z}_k \quad (24)$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}X_j \quad (25)$$

معادلات مربوط به ($\dot{Z}_k$) برای اجزای سیستم تبرید جذبی در پیوست (الف) آمده است.

۵-۱- محاسبه اندازه اجزای سیستم

در مبادله‌کن‌های گرمایی تک گذره، آهنگ گرمای مبادله شده بین دو سیال گرم و سرد را می‌توان از رابطه (۲۶) بدست آورد:

$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T_m \quad (26)$$

در این رابطه A و U به ترتیب سطح تبادل گرما و ضریب انتقال گرمای کل می‌باشند. ΔT_m اختلاف دمای لگاریتمی است که از دمای جریان-های ورودی و خروجی به مبادله‌کن‌های گرما بدست آمده و از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln(\Delta T_0 / \Delta T_L)} \quad (27)$$

ضریب انتقال گرما نیز از رابطه (۲۸) قابل حصول است:

$$U = \frac{1}{(D_o/D_i)(1/h_i) + (D_o/D_i).F_i + [1/(2k)].D_o.\ln(D_o/D_i) + F_o + (1/h_o)} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸) F_0 و F_i به ترتیب ضریب رسوب داخلی و خارجی لوله-های اجزای سیستم هستند که مقدار آنها برابر $0.09 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ در نظر گرفته شده است. همچنین جنس مبادله‌کن‌های گرما مسی در نظر گرفته شده که مقدار رسانایی گرمایی آن برابر 383.2 (W/m.K) می‌باشد [۳۵]. روابط مختلفی که برای محاسبه ضریب انتقال گرمای داخلی و خارجی برای مبادله‌کن‌های گرمایی استفاده می‌شود، در پیوست (ب) آمده است.

پس از محاسبه اندازه اجزای سیستم، هزینه‌های مجهول جریان‌ها با حل همزمان معادلات خطی محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه نرخ هزینه جریان‌های سیستم، نرخ هزینه محصول ($\dot{C}_p$) از رابطه (۵۱) بدست می‌آید.

$$\dot{C}_p (\$/\text{year}) = \dot{C}_e (\$/h) \times Nh (h/\text{year}) \quad (51)$$

که (Nh) در آن تعداد ساعت کار سالانه سیستم می‌باشد.

جدول ۲ - آنتالپی مازاد مخلوط آب - EMIM[TFA] و نتایج آزمایشگاهی فیکه و همکاران [۱۲] بصورت تابعی از کسر مولی آب

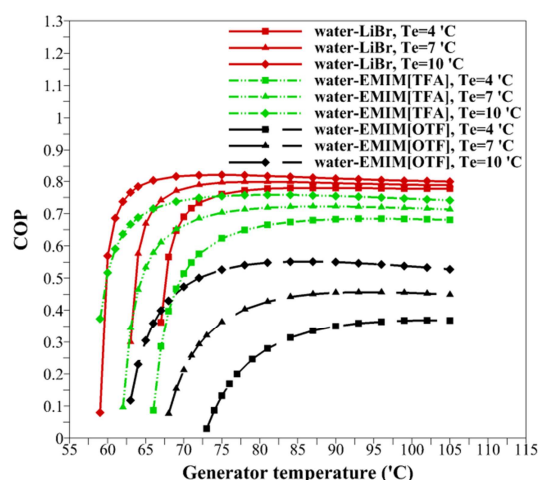
آنتالپی مازاد (J/mol)							
۳۴/۱۵		۳۳/۱۵		۳۲/۱۵		۳۱/۱۵	
کار حاضر	نتایج آزمایشگاهی [۱۲]	کار حاضر	نتایج آزمایشگاهی [۱۲]	کار حاضر	نتایج آزمایشگاهی [۱۲]	کار حاضر	نتایج آزمایشگاهی [۱۲]
-۱۱	-۱۰	-۳	-۱	-۳	-۳	-۷	-۶/۲۳
-۱۰۸۴	-۱۱۱۰	-۱۰۹۱	-۱۱۱۰	-۱۰۹۳	-۱۰۹۰	-۱۰۹۲/۳	-۱۰۸۰
-۱۸۲۰	-۱۸۳۰	-۱۸۵۳	-۱۸۴۰	-۱۸۷۰	-۱۸۶۰	-۱۸۸۳/۴۷	-۱۸۷۰
-۲۰۲۸	-۲۰۳۰	-۲۱۳۳	-۲۱۴۰	-۲۱۹۶	-۲۱۹۰	-۲۲۵۴/۳۶	-۲۲۶۰
-۱۵۰۱	-۱۵۱۰	-۱۶۵۰	-۱۶۷۸	-۱۷۴۴	-۱۷۷۰	-۱۸۳۴/۰۸	-۱۸۷۰
-۵	-۶	-۴	-۶	۳	۶	۰	۰/۰۰۵

جدول ۳- مقایسه آنتروپی مخلوط آب - لیتیوم بروماید توسط روش غیر تصادفی دو مایع و رابطه کایتا [۳۱]

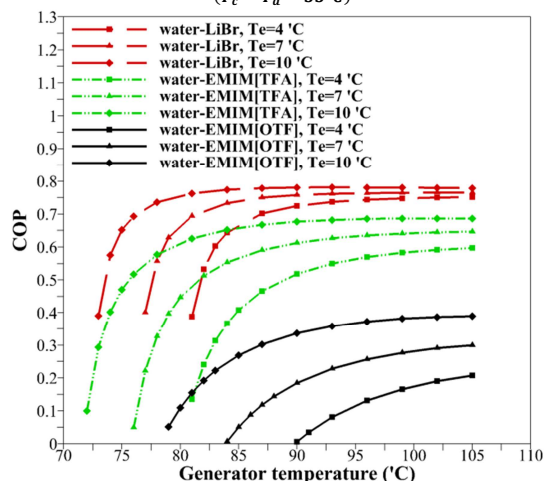
آنتروپی ($kJ/kg.K$)								
۳۷۳/۱۵			۳۵۳/۱۵			۳۳۳/۱۵		
کار حاضر	رابطه کایتا [۳۱]	کار حاضر	رابطه کایتا [۳۱]	کار حاضر	رابطه کایتا [۳۱]	کار حاضر	رابطه کایتا [۳۱]	کار حاضر
۰/۸۱۹	۰/۸۲۲	۰/۶۸۱	۰/۶۸۳	۰/۵۲۹	۰/۵۳۸	۰/۳۸۱	۰/۳۸۶	۰/۴
۰/۷۴۵	۰/۷۴۵	۰/۶۱۹	۰/۶۱۵	۰/۴۷۳	۰/۴۷۹	۰/۳۲۹	۰/۳۳۵	۰/۴۵
۰/۶۶۹	۰/۶۷۷	۰/۵۵۳	۰/۵۵۴	۰/۴۲۹	۰/۴۲۶	۰/۲۹۱	۰/۲۹۲	۰/۵
۰/۶۰۹	۰/۶۱۶	۰/۵۰۸	۰/۵۰۲	۰/۳۷۹	۰/۳۸۲	۰/۲۶۱	۰/۲۵۶	۰/۵۵
۰/۵۶۶	۰/۵۶۴	۰/۴۵۵	۰/۴۵۸	۰/۳۴۳	۰/۳۴۶	۰/۲۲۸	۰/۲۲۹	۰/۶
۰/۵۱۹	۰/۵۲۲	۰/۴۲۱	۰/۴۲۴	۰/۳۲۴	۰/۳۲۰	۰/۲۰۹	۰/۲۱۲	۰/۶۵

۸- بحث و نتایج

تحقیقات اولیه به وضوح نشان می‌دهد که عملکرد سیستم‌های تبرید جذبی که از مایع یونی به عنوان جاذب استفاده می‌کنند امیدوار کننده می‌باشد. در ابتدا تأثیر پارامترهای عملکردی بر روی ضریب عملکرد و بازده انرژی سیستم بررسی شده است. شکل‌های ۲ و ۳ تأثیر دماهای ژنراتور، اواپراتور و چگالنده بر روی ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی با مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهند.



شکل ۲- تغییرات ضریب عملکرد سیستم‌های جذبی ($T_c = T_a = 33^\circ C$)



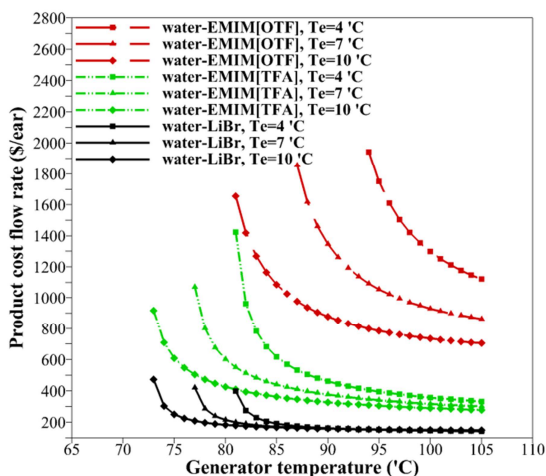
شکل ۳- تغییرات ضریب عملکرد سیستم‌های جذبی ($T_c = T_a = 39^\circ C$)

همانطور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در تمامی سیستم‌ها مقادیر بالای ضریب عملکرد در مقادیر پایین دمای چگالنده و بالای اواپراتور حاصل می‌شود. همچنین در دمای اواپراتور و چگالنده مشخص یک مقدار حداقلی برای دمای ژنراتور وجود دارد که در آن ضریب عملکرد سیستم حداکثر می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش دمای ژنراتور، ضریب عملکرد ابتدا افزایش قابل توجهی نشان داده و سپس شیب منحنی آن تقریباً ثابت می‌شود. تجزیه و تحلیل پارامتری نشان می‌دهد که ضریب عملکرد سیستم با مخلوط آب - ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو متان سولفونیت (EMIM[OTF]) بسیار ضعیف می‌باشد. اما نتایج مخلوط آب - ۱- اتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تری فلورو استیت (EMIM[TFA]) بسیار امیدوار کننده بوده به طوری که ضریب عملکرد این سیستم نزدیک به ضریب عملکرد سیستم آب - لیتیوم بروماید و کمی پایینتر از آن بوده است.

تأثیر دماهای ژنراتور، اواپراتور و چگالنده بر روی بازده انرژی سیستم در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که بازده انرژی در مقادیر پایین دمای چگالنده و اواپراتور بیشتر می‌باشد. همچنین یک مقدار مشخص برای دمای ژنراتور وجود دارد که در آن بازده انرژی سیستم حداکثر است. با افزایش دمای ژنراتور، بازده انرژی ابتدا افزایش یافته تا به مقدار حداکثر خود برسد و پس از آن با افزایش بیشتر دمای ژنراتور مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که بازده انرژی سیستم با مخلوط آب - EMIM[OTF] نیز همانند ضریب عملکرد آن بسیار پایین می‌باشد. اما برای مخلوط آب - EMIM[TFA] بازده انرژی نزدیک به سیستم آب - لیتیوم بروماید است. تغییرات نرخ هزینه محصول با دماهای ژنراتور، اواپراتور و چگالنده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در کمترین مقدار دمای چگالنده و مقادیر بالای دماهای اواپراتور و ژنراتور، کمترین مقدار برای نرخ هزینه محصول بدست آمده است.

نتایج تحلیل پارامتری را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- بیشترین ضریب عملکرد سیستم‌های آب - EMIM[TFA] و آب - EMIM[OTF] به ترتیب ۷٪ و ۲۳٪ نسبت به ضریب عملکرد سیستم آب - لیتیوم بروماید کمتر می‌باشد.
- بیشترین بازده انرژی سیستم‌های آب - EMIM[TFA] و آب - EMIM[OTF] به ترتیب ۱۸٪ و ۵۸٪ نسبت به بازده انرژی سیستم آب - لیتیوم بروماید کمتر می‌باشد.
- کمترین نرخ هزینه محصول سیستم‌های آب - EMIM[TFA] و آب - EMIM[OTF] به ترتیب ۷۳٪ و ۳۰٪ نسبت به نرخ هزینه محصول سیستم آب - لیتیوم بروماید بیشتر می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات ضریب عملکرد سیستم های جذبی
($T_c = T_a = 39^\circ C$)

برای لیتیوم بروماید بعنوان جاذب در این سیستم ها نمی باشد. لذا در ادامه، سیستم های جذبی با مخلوط های آب - لیتیوم بروماید و آب - EMIM[TFA] جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده اند.

۸-۱- بهینه سازی با دو تابع هدف

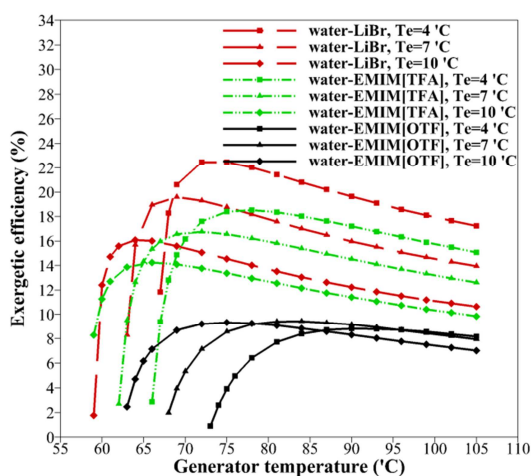
به منظور بهینه سازی دو هدفی سیستم تبرید جذبی با زوج سیال عامل های مختلف، ترکیب های دوتایی مختلفی از توابع هدف ضریب عملکرد، بازده اگزرژی و نرخ هزینه محصول در نظر گرفته می شوند. نتایج بهینه یابی دو هدفی در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین جبهه های پارتو در شکل های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده اند. می توان دید که دو تابع هدف در بازه ی مشخصی از دماهای ژنراتور و اواپراتور متناقض می باشند یعنی بهتر شدن یکی از آنها سبب بدتر شدن دیگری شده است. به هرحال، اگر پارامترهای طراحی براساس جبهه های پارتو انتخاب گردد بهینه ترین حالت برای دو تابع هدف بوجود می آید.

در شکل ۸ می توان مشاهده کرد که منحنی های جواب تقریباً به صورت خطی می باشد و با افزایش بازده اگزرژی سیستم (بیشتر از ۲۱٪ و ۱۷٪ به ترتیب برای سیستم های آب - لیتیوم بروماید و آب - EMIM[TFA])، ضریب عملکرد با شیب بیشتری کاهش یافته است.

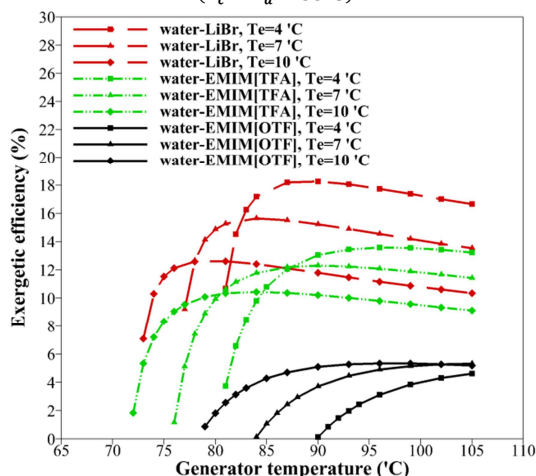
جبهه پارتو تابع های هدف ضریب عملکرد و نرخ هزینه محصول و نیز دو تابع بازده اگزرژی و نرخ هزینه محصول در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در سیستم آب - لیتیوم بروماید با افزایش ضریب عملکرد و بازده اگزرژی، نرخ هزینه محصول با شیب کمی افزایش می یابد درحالی که در سیستم آب-EMIM[TFA] برای داشتن ضریب عملکرد و بازده اگزرژی بیشتر نرخ هزینه محصول به سرعت افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بهینه سازی دو هدفه سیستم های تبرید جذبی با جاذب لیتیوم بروماید و مایع یونی می توان مشاهده کرد که با جایگزین کردن مایع یونی به جای لیتیوم بروماید، ضریب عملکرد و بازده اگزرژی کاهش می یابد و نرخ هزینه محصول آن افزایش می یابد.

۸-۲- بهینه سازی با سه تابع هدف

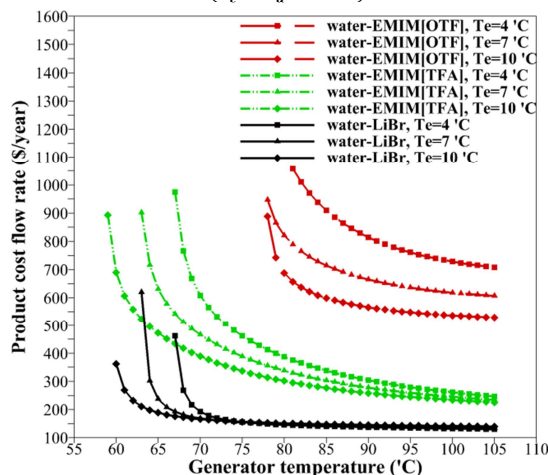
در حالت بهینه سازی با سه تابع هدف، تابع های هدف ضریب عملکرد، بازده اگزرژی و نرخ هزینه محصول به طور همزمان بهینه گردیده اند. در



شکل ۴- تغییرات بازده اگزرژی سیستم های جذبی
($T_c = T_a = 33^\circ C$)



شکل ۵- تغییرات بازده اگزرژی سیستم های جذبی
($T_c = T_a = 39^\circ C$)

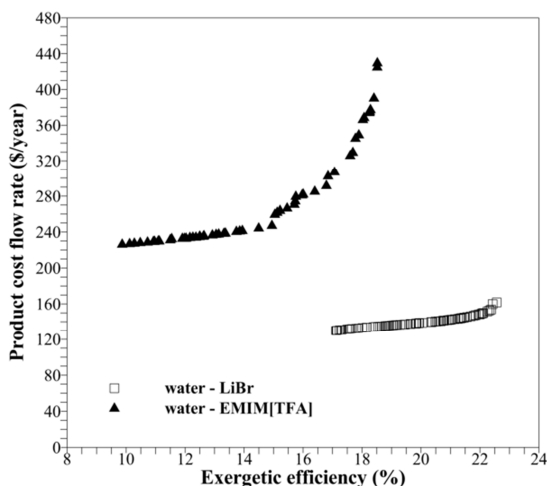


شکل ۶- تغییرات نرخ هزینه محصول سیستم های جذبی
($T_c = T_a = 33^\circ C$)

همانطور که گفته شد عملکرد سیستم آب - EMIM[OTF] بر خلاف سیستم آب - EMIM[TFA] در مقایسه با آب - لیتیوم بروماید از لحاظ ترمودینامیکی و اقتصادی بسیار ضعیف بوده و جایگزین مناسبی

جدول ۴ - مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف در بهینه‌سازی دو هدفه

زوج میرد و جاذب	(COP, η_{exergy})	$(COP, \dot{C}_p)$	$(\dot{C}_p, \eta_{exergy})$
آب - لیتیوم بروماید	$0.75 < COP < 0.82$	$0.78 < COP < 0.82$	$129/93 < \dot{C}_p < 161/62$
	$14/8 \% < \eta_{exergy} < 22/6 \%$	$13/0/15 < \dot{C}_p < 158/0.5$	$17/12 \% < \eta_{exergy} < 22/57 \%$
	$73/13 < T_g < 74/94$	$73/99 < T_g < 10.5$	$73/41 < T_g < 10.5$
	$4 < T_e < 10$	$4 < T_e < 10$	$T_e = 4$
	$T_c = T_a = 33$	$T_c = T_a = 33$	$T_c = T_a = 33$
آب - EMIM[TFA]	$0.65 < COP < 0.76$	$0.74 < COP < 0.76$	$225/98 < \dot{C}_p < 429/38$
	$12/42 \% < \eta_{exergy} < 18/52 \%$	$225/91 < \dot{C}_p < 294/73$	$9/87 \% < \eta_{exergy} < 18/52 \%$
	$76/48 < T_g < 82/0.9$	$81/72 < T_g < 10.5$	$76/87 < T_g < 10.5$
	$4 < T_e < 10$	$T_e = 10$	$4 < T_e < 10$
	$T_c = T_a = 33$	$T_c = T_a = 33$	$T_c = T_a = 33$



شکل ۱۰- جبهه پارتو دو تابع بهینه شده بازده اگزرژی و نرخ هزینه محصول

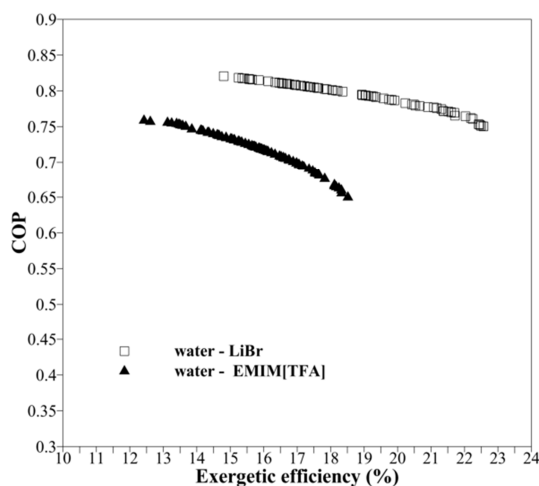
جدول ۵- مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف در بهینه‌سازی سه هدفه

سیستم آب - لیتیوم بروماید	سیستم آب - EMIM[TFA]
$0.75 < COP < 0.82$	$0.66 < COP < 0.76$
$10/84 \% < \eta_{exergy} < 22/55 \%$	$9/93 \% < \eta_{exergy} < 18/48 \%$
$142/19 < \dot{C}_p < 176/69$	$236/82 < \dot{C}_p < 415/99$
$69/19 < T_g < 10.5$	$74/0.5 < T_g < 10.5$
$4 < T_e < 10$	$4 < T_e < 10$
$T_c = T_a = 33$	$T_c = T_a = 33$

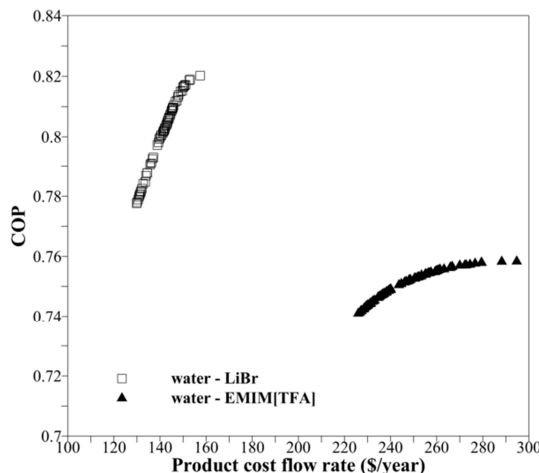
سیستم پایه آب - لیتیوم بروماید، با توجه به حل مشکلات موجود در سیستم آب - لیتیوم بروماید و مزایای فشار بخار ناچیز، عدم کریستالیزاسیون و خاصیت خوردگی ضعیف نسبت به محلول آب - لیتیوم بروماید، جایگزین کردن مایع یونی EMIM[TFA] به عنوان جاذب می‌تواند یک گزینه مناسب برای استفاده در چرخه و تحقیقات بیشتر باشد. همچنین مطالعات در خصوص یافتن مایعات یونی مناسب- تر برای استفاده در چرخه تبرید جذبی با عملکرد نزدیکتر و یا حتی بالاتر از سیستم آب - لیتیوم بروماید بایستی ادامه یابد.

۹- نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل پارامتری و بهینه‌سازی چرخه تبرید جذبی با میرد آب و جاذب‌های لیتیوم بروماید و دو مایع یونی مختلف ارائه شده است. تحلیل پارامتریک چرخه بصورت تاثیر تغییرات پارامترهای طراحی شامل دماهای ژنراتور، اواپراتور، چگالنده و جاذب بر روی توابع هدف ضریب عملکرد و بازده اگزرژی سیستم انجام گرفته است. بیشترین



شکل ۸- جبهه پارتو دو تابع بهینه شده ضریب عملکرد و بازده اگزرژی



شکل ۹- جبهه پارتو دو تابع بهینه شده ضریب عملکرد و نرخ هزینه محصول

جدول ۵ جوابهای حاصل از این بهینه‌یابی در سیستم‌های آب - لیتیوم بروماید و آب - EMIM[TFA] نشان داده شده است. از تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های تبرید جذبی می‌توان دریافت که با توجه به شرایط محیطی بایستی کمترین دمای ممکن برای چگالنده و جاذب را در نظر گرفت. همچنین بدون در نظر گرفتن دمای اواپراتور، محدوده بهینه‌ای برای دمای ژنراتور وجود دارد که در آن سیستم در شرایط مطلوبی قرار دارد.

علیرغم پایین تر بودن بازده اگزرژی و ضریب عملکرد و همچنین بالاتر بودن نرخ هزینه محصول سیستم آب - EMIM[TFA] نسبت به

- [2] Sen M., Paolucci S., The use of ionic liquids in refrigeration, Proceedings of IMECE ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2006.
- [3] Sun J., Fu L., Zhang S.G., A review of working fluids of absorption cycles, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, pp. 1899–1906, 2012.
- [4] Kim S., Kim Y.J., Joshi Y.K., Fedorov A.G., Kohl P.A., Absorption heat pump/refrigeration system utilizing ionic liquid and hydrofluorocarbon refrigerants, Journal of Electronic Packaging, 134, pp. 1-9, 2012.
- [5] Zhang X., Hu D., Performance analysis of the single-stage absorption heat transformer using a new working pair composed of ionic liquid and water, Applied Thermal Engineering 37, pp.129-135, 2012.
- [6] Zhang X. D., Hu D., Performance simulation of the absorption chiller using water and ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium dimethylphosphate as the working pair, Applied Thermal Engineering, No. 31, pp. 3316-3321, 2011.
- [7] Liang S.Q., Zhao J., Wang L., Huai X. L., Absorption refrigeration cycle utilizing a new working pair of ionic liquid type, Journal of Engineering Thermophysics, No. 31, pp. 1627-1630, 2010.
- [8] Kim Y. J., Kim S., Joshi Y. K., Fedorov A. G., Kohl P. A., Waste-heat driven miniature absorption refrigeration system using ionic-liquid as a working fluid, In Proceedings of the ASME5th International Conference on Energy Sustainability, Washington, DC, USA, 1299-1305, 2011.
- [9] Kim Y. J., Kim S., Joshi Y. K., Fedorov A. G., Kohl P. A., Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system with ionic-liquid/refrigerant mixture as a working fluid, Energy, No. 44, pp. 1005-1016, 2012.
- [10] Zuo G., Zhao Z., Yan S., Zhang X., Thermodynamic properties of a new working pair: 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate and water, Chemical Engineering Journal, No. 156, pp. 613-617, 2010.
- [11] Yokozeki A., Shiflett M. B., Water solubility in ionic liquids and application to absorption cycles, Industrial & Engineering Chemistry Research, No. 49, pp. 9496-9503, 2010.
- [12] Ficke L. E., Rodriguez H., Brennecke J. F., Heat Capacities and Excess Enthalpies of 1-Ethyl-3-methylimidazolium-Based Ionic Liquids and Water. Journal of Chemical Engineering, No. 53, pp. 2112-2119, 2008.
- [13] Abumandour E. S., Mutelet F., Performance of an absorption heat transformer using new working binary systems composed of ionic liquid and water, Applied Thermal Engineering, No. 94, pp. 579-589, 2016.
- [14] Kim Y. J., Gonzalez M., Exergy Analysis of an Absorption Refrigeration System Using an Ionic Liquid as a Working Fluid in the Chemical Compressor, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, July, 16-19, 2012.
- [15] Chen W., Liang S., Thermodynamic analysis of absorption heat transformers using [mmim] DMP/H₂O and [mmim]DMP/CH₃OH as working fluids. Applied Thermal Engineering 99, 846-856, 2016.
- [16] Yokozeki A., Shiflett M. B., Vapor-liquid equilibria of ammonia + ionic liquid mixtures, Applied Energy, No. 84, pp. 1258-1273, 2007.
- [17] Yokozeki A., Theoretical performances of various refrigerant-absorbent pairs in a vapor-absorption refrigeration cycle by the use of equations of state, Applied Energy, No. 80, pp. 383-399, 2005.
- [18] Chen W., Bai Y., Thermal performance of an absorption-refrigeration system with [emim] Cu₂Cl₅/NH₃ as working fluid. Energy 112, 332-341, 2016.
- [19] Sujatha I., Venkatarathnam G., Performance of a vapour absorption heat transformer operating with ionic liquids and ammonia, Energy, Volume 141, 15 December 2017, Pages 924-936.
- [20] Wei Wu, Tian You, Haiyang Zhang, Xianting Li, Comparisons of Different Ionic Liquids Combined with Trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) as Absorption Working Fluids, International Journal of Refrigeration, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.12.011, 2017.
- [21] Misra R.D., Sahoo P.K., Sahoo S., Gupta A., Thermoeconomic optimization of a single effect water/LiBr vapour absorption refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 26, 158–169, 2003.
- [22] Misra R.D., Sahoo P.K., Gupta A., Thermoeconomic evaluation and optimization of a double-effect H₂O/LiBr vapour-absorption refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 28, pp.331–343, 2005.
- [23] Mishra M., Das P.K., Sarangi S., Optimum Design of Cross flow Plate-Fin Heat Exchangers through Genetic Algorithm, International Journal of Heat Exchangers, 5, pp. 379–402, 2004.

ضریب عملکرد و بازده اگزرژی سیستم آب – EMIM[TFA] نسبت به سیستم آب – لیتیوم بروماید به ترتیب ۷٪ و ۱۸٪ کمتر می‌باشد. و کمترین نرخ هزینه محصول سیستم آب – EMIM[TFA] نسبت به سیستم آب – لیتیوم بروماید ۷۳٪ بیشتر می‌باشد. سیستم آب – EMIM[OTF] در مقایسه با سیستم آب – EMIM[TFA] عملکرد ضعیفتری را دارد و پارامترهای ضریب عملکرد و بازده اگزرژی آن نسبت به سیستم آب – لیتیوم بروماید به ترتیب ۲۷٪ و ۴۹٪ کمتر می‌باشد. همچنین کمترین نرخ هزینه محصول آن نسبت به سیستم آب – EMIM[TFA] ۱۳۵٪ بیشتر می‌باشد. الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چرخه تبرید جذبی در حالت دو و سه تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. جوابهای حاصل از بهینه‌یابی چند هدفه برخلاف بهینه‌یابی تک هدفه بصورت مجموعه‌ای از جوابها می‌باشد که طراح می‌تواند با توجه به ملزومات مورد نظر یکی از این جوابها را انتخاب کند. با وجود عملکرد ضعیفتر سیستم آب – EMIM[TFA] نسبت به سیستم آب – لیتیوم بروماید، با توجه به حل مشکلات موجود در سیستم آب – لیتیوم بروماید، جایگزین کردن مایع یونی EMIM[TFA] به عنوان جاذب در سیستم می‌تواند یک گزینه بسیار موثر باشد.

۱۰- فهرست علائم

A	سطح (m^2)
COP	ضریب عملکرد
c_p	ظرفیت گرمایی ($kJ/kg \cdot K$)
D	قطر (m)
G^E	انرژی مازاد گیبز (J/mol)
h_i, h_o	ضریب رسانش سطح‌های داخلی و خارجی ($W/m^2 \cdot K$)
H^E	آنتالپی مازاد (J/mol)
IL	مایع یونی
M	جرم مولکولی (J/mol)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Nh	ساعات کارکرد سالانه سیستم (h)
p_1^{sat}	فشار اشباع آب (kPa)
$\dot{Q}$	آهنگ انتقال گرما (kW)
S	آنتروپی مخصوص ($kJ/kg \cdot K$)
ΔT_0	اختلاف دمای جریان سرد و گرم در ورودی مبادله‌کن
ΔT_L	اختلاف دمای جریان سرد و گرم در خروجی مبادله‌کن
ΔT_m	اختلاف دمای متوسط لگاریتمی
U	ضریب انتقال گرما ($W/m^2 \cdot K$)
w_s	کسر جرمی جاذب در محلول غلیظ
w_w	کسر جرمی جاذب در محلول رقیق
x_1	کسر مولی آب
x_2	کسر مولی مایع یونی

علائم یونانی

γ_1	ضریب فعالیت آب
γ_2	ضریب فعالیت مایع یونی
α	فاکتور غیر تصادفی
ρ	چگالی (kg/m^3)

۱۱- مراجع

- [1] Hassan H.Z., Mohamad A.A., A review on solar cold production through absorption technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, pp.5331–5348, 2012.

هزینه سرمایه‌گذاری هر جزء بصورت رابطه (الف-۴) اصلاح شده است [۲۱]:

$$\dot{Z}_k = Z_{k,CRF} \cdot \varphi / (Nh \times 3600) \quad (\text{الف-۴})$$

φ فاکتور نگهداری (۱/۰۶)، Nh کارکرد سالانه سیستم (۱۰۰۰) و CRF ضریب برگشت سرمایه از رابطه (الف-۵) بدست می‌آید:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{الف-۵})$$

در رابطه بالا i نرخ بهره (۰/۱۵) و n عمر سیستم (۱۰ سال) می‌باشد.

پیوست (ب)

با استفاده از تقریب جنیلینسکی [۴۱] برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک که در رابطه‌های (ب-۱) و (ب-۲) آمده است، ضریب انتقال حرارت را می‌توان توسط رابطه (ب-۳) بدست آورد:

$$Nu = \frac{fr}{8} (Re - 1000) \left[\frac{Pr}{1 + 12.7(fr/8)^{0.5}(Pr^{0.66} - 1)} \right] \quad (\text{ب-۱})$$

$$3000 < Re < 5 \times 10^6, 0.5 < Pr < 2000$$

$$fr = (0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (\text{ب-۲})$$

$$h_i = \frac{Nuk}{d} \quad (\text{ب-۳})$$

چگالش بخار در لوله‌های افقی با سرعت کم [۴۲]:

$$h_i = 0.555 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)d} \right]^{1/4} \quad (\text{ب-۴})$$

که در آن $g, \rho_l, \rho_v, k_l, \mu_l$ به ترتیب شتاب گرانش، چگالی فاز مایع مبرد، چگالی بخار مبرد، ضریب رسانش و ویسکوزیته فاز مایع می‌باشند. T_s و T_{sat} نیز به ترتیب دمای اشباع و دمای سطح هستند. گرمای نهان اصلاح شده بصورت رابطه (ب-۵) بیان می‌گردد.

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} c_{p,l}(T_{sat} - T_s) \quad (\text{ب-۵})$$

ضریب انتقال حرارت خارجی در ژنراتور [۲۶]:

$$h_{o,water-LiBr} = 5554.3 \Gamma^{0.236} \quad (\text{ب-۶})$$

Γ دبی جرمی واحد محیط ترشونده است. با فراهم آوردن شرایط مشابه ژنراتور سیستم آب - لیتیوم بروماید و جایگزین کردن مخلوط آب - مایع یونی، رابطه ی ضریب انتقال حرارت خارجی در ژنراتور سیستم آب و مایع یونی بدست آمده است که بصورت رابطه (ب-۷) می‌باشد.

$$h_{o,water-EMIM[TFA]} = 4596.6 \Gamma^{0.346} \quad (\text{ب-۷})$$

ضریب انتقال حرارت خارجی چگالنده [۴۳]:

$$h_o = 0.725 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)d} \right]^{0.25} \quad (\text{ب-۸})$$

ضریب انتقال حرارت خارجی در اواپراتور [۴۴]:

$$h_o = \frac{k}{\delta} (0.029 Re^{0.53} Pr^{0.344}) \quad (\text{ب-۹})$$

$$\delta = \left(\frac{3\mu l}{\rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu}$$

ضریب انتقال حرارت خارجی جاذب [۲۶]:

$$h_{o,water-LiBr} = 2000 \left[\frac{\mu/\rho}{10^{-6}} \right]^{-1.7} \quad (\text{ب-۱۰})$$

با ثابت نگهداشتن پارامترهای سیستم آب - لیتیوم بروماید و جایگزین کردن مخلوط آب - مایع یونی در آن، رابطه‌ای مشابه رابطه هافمن و همکارانش برای ضریب انتقال حرارت خارجی در جاذب سیستم آب و مایع یونی بدست آمده است که بصورت رابطه (ب-۱۱) می‌باشد.

$$h_{o,water-EMIM[TFA]} = 1656 \left[\frac{\mu/\rho}{10^{-6}} \right]^{-1.3} \quad (\text{ب-۱۱})$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در مبدل حرارتی محلول، با توجه به رژیم جریان از روابط جریان داخل لوله استفاده شده است [۳۵].

- [24] Liang S., Chen W., Guo Y. and Tang D., Ionic Liquids Facilitate the Development of Absorption Refrigeration Additional information is available at the end of the chapter, <http://dx.doi.org/10.5772/58982>.
- [25] Bakhtiari B., Fradette L., Legros R., Paris J., A model for analysis and design of H2O-LiBr absorption heat pumps, *Energy Convers Manage*, No. 52, pp. 1439-1448, 2011.
- [26] Hoffmann L., Greiter I., Wagner A., Weiss V., Alefeld G., Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solutions of LiBr with and without surfactants, *Int J Refrig*, No. 19, pp. 331-341, 1996.
- [27] Gomri R., Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 1279-1287
- [28] Renon H., Prausnitz J. M., Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures, *AIChE Journal*, 1968;14:135-144. No. 14, pp. 135-144, 1968.
- [29] Shiflett M. B., Yokozeki A., Solubility and diffusivity of hydrofluorocarbons in room-temperature ionic liquids, *AIChE Journal*, No. 52, pp. 1205-1219, 2009.
- [30] Simoni L. D., Ficke L. E., Lambert C. A., Stadtherr M. A., Brennecke J. F., Measurement and Prediction of Vapor-Liquid Equilibrium of Aqueous 1-Ethyl-3-methylimidazolium-Based Ionic Liquid Systems, *Ind. Eng. Chem. Res*, No. 49, pp. 3893-3901, 2010.
- [31] Kaita Y., Thermodynamic properties of lithium bromide - water solutions at high temperatures, *International Journal Refrigeration*, No. 24, pp. 374-390, 2001.
- [32] Rodriguez H., Brennecke J. F., Temperature and Composition Dependence of the Density and Viscosity of Binary Mixtures of Water + Ionic Liquid, *Journal of Chemical Engineering*, No. 51, pp. 2145-2155, 2006.
- [33] Tenney C. M., Massel M., Mayes J. M., Sen M., Brennecke J. F., Maginn E. J., A Computational and Experimental Study of the Heat Transfer Properties of Nine Different Ionic Liquids, *Journal of Chemical & Engineering Data*, No. 59, pp. 391-399, 2014.
- [34] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., Thermal design and optimization. New York, John Wiley and Sons Inc, 1996.
- [35] Florides G., Kalogirou S., Tassou S., Wrobel L., Design and construction of a LiBr-water absorption machine, *Energy Convers Manage*, No. 15, pp. 2483-2508, 2003.
- [36] Bagherinejad A., Yaghoubi M., Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, No. 52, pp. 193-2203, 2011.
- [37] Holland J. H., Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [38] Renner G., Ekart A., Genetic algorithms in computer aided design, *Comput. Aided Design*, 35, pp. 709-726, 2003.
- [39] Srinivas N., Deb K., Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms, *Evolutionary Comput*, 2, pp.221-248, 1994.
- [40] Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyariva T., A fast and elitist multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput*, 6, pp.182-197, 2002.
- [41] Gnielinski V., New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *Int Chem Eng*, No. 16, pp. 359-367, 1976.
- [42] Bergman T., Incropera F., Fundamentals of heat and mass transfer, Hoboken (NJ), Wiley, 2011.
- [43] Holman J., Heat transfer, New York, McGraw-Hill, 2002.
- [44] patnaik V., Blanco H. P., Ryan W. A., A simple analytical model for the design of vertical tube absorbers, *ASHRAE Trans*, pp. 69-80, 1993.

پیوست (الف)

هزینه مبدل‌های حرارتی سیستم بصورت زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$Z_k = Z_{R,k} \left(\frac{A_k}{A_R} \right)^{0.6} \quad (\text{الف-۱})$$

برای پمپ و موتور [۲۱]:

$$Z_P = Z_{R,P} \left(\frac{W_P}{W_{R,P}} \right)^{0.26} \left(\frac{1-\eta_P}{\eta_P} \right)^{0.5} \quad (\text{الف-۲})$$

$$Z_m = Z_{R,m} \left(\frac{W_m}{W_{R,m}} \right)^{0.87} \left(\frac{1-\eta_m}{\eta_m} \right) \quad (\text{الف-۳})$$

قیمت واحد انرژی جریان بخار مورد استفاده در ژنراتور و قیمت انرژی الکتریکی مورد استفاده پمپ به ترتیب $(\$/kg)$ و $(\$/GJ)$ و ۰/۰۰۶۶۱۴ و ۱۰ در نظر گرفته شده است [۲۱].