



امکان سنجی جایگزینی مبردهای سازگار با محیط‌زیست در سیستم‌های تبید متداول^۱

مصطفی مافی^{۱*}, مرتضی شمالي^۲, حمیدرضا آجورلو^۳

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، صندوق پستی ۳۴۱۴۹۱۶۸۱۸

چکیده

در دهه‌های اخیر مبردهای طبیعی به علت سازگاری با محیط‌زیست، در دسترس بودن و خواص مناسب ترموفیزیکی، به عنوان جایگزینی مناسب برای مبردهای مصنوعی در سیستم‌های بروتی، مطرح شده‌اند. در این پژوهش، مبردهای پروپیلن (R1270)، پروپان (R290)، ایزوبوتان (R134a)، R22، R12، R407c، R410a، R600a) برای استفاده در سیستم‌های تبید متداول مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مطالعات موردنی، پارامترهای ترمودینامیکی و فنی چرخه‌های تبید متداول با استفاده از مبردهای مذکور در گستره‌ی دمایی 30-تا 10 درجه‌ی سلسیوس در تبیخ‌نکنده و همچنین چرخه‌ای پمپ گرمایی با گستره‌ی دمایی 45 تا 60 درجه‌ی سلسیوس در چگانه مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که پروپیلن، جایگزینی مناسب برای مبردهای مصنوعی در چرخه‌های تبید متداول در بازه دمایی فوق الذکر است.

اطلاعات مقاله

پادداشت پژوهشی

دربافت: ۰۳ مهر ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۴ مهر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۳ آذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

مبردهای سازگار با محیط‌زیست

میبد جایگزین

سیستم تبید متداول

پمپ گرمایی

A feasibility study on substitution of environmentally friendly refrigerants in common refrigeration systems

Mostafa Mafi*, Morteza Shomali, Hamidreza Ajorloo

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
* P.O.B. 3414916818, Qazvin, Iran, m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Research Note

Received 24 September 2016

Accepted 15 October 2016

Available Online 23 November 2016

Keywords:

Environmentally Friendly Refrigerants

Substitute Refrigerant

Common Refrigeration System

Heat pump

ABSTRACT

In recent decades, due to environmental sustainability, abundance, availability and appropriate thermo-physical properties, natural refrigerants have been considered with potential of substitute refrigerants. In this study, Propylene (R1270), Propane (R290), Isobutane (R600a), R407c, R410a, R12, R22 and R134a have been investigated as refrigerant in common refrigeration systems. In the case studies, the thermodynamic and technical parameters of the cycle, using the above mentioned refrigerants, have been investigated for common refrigeration systems in temperature range of -30°C to 10°C in the evaporator, and also for heat pump systems with a temperature range of 45°C to 60°C in the condenser. Finally, Propylene was introduced as a refrigerant to replace with synthetic refrigerants in the above mentioned temperature ranges in common refrigeration cycles.

-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسایل زیست محیطی مرتبط با گرمایش کره‌ی زمین و تخریب لایه‌ی ازن نقشی اساسی در توسعه‌ی سامانه‌های تهویه مطبوعی و بروتی با استفاده از مبردهای طبیعی داشته‌اند. برای اولین بار در سال 1985 (قرداد داد وین) نقش اتم‌های کلر در ترکیب شیمیایی مبردها به عنوان عامل مخرب لایه‌ی ازن مطرح شد و پس از آن و در سال 1987 (پروتکل مونترال)، تولید مبردهای مخرب لایه‌ی ازن با منوعیت و محدودیت‌هایی همراه شد. سرانجام در کنفرانس کپنه‌اگ توقف تولید کلروفلوروکربن‌ها از جمله مبرد R12 تا پایان سال 1994 به تصویب رسید [1].

امروزه مبردهای R12، R22 و R134a به دلیل خواص ترمودینامیکی مناسب و غیرقابل اشتعال بودن، کاربردهای بسیاری در صنایع بروتی خانگی و صنعتی دارند. با این حال طبق آچه گفته شد و براساس پروتکل مونترال و

طبق یک برنامه‌ی زمان‌بندی مشخص، این مبردها باید در آینده‌ی نزدیک به تدریج از چرخه‌ی صنایع بروتی حذف شوند. از این‌رو در دهه‌های اخیر توجه ویژه‌ای به توسعه‌ی استفاده از مبردهای طبیعی و سازگار با محیط‌زیست جلب شده است.

جیا [2] مبردهای R404a و R410a را به عنوان مبردهای مناسب برای جایگزینی با مبرد R22 مورد بررسی قرار داد. براساس نتایج این تحقیق مبرد R404a به عنوان مبرد جایگزین R22 معرفی گردید. ژوهانسون و لونکویست [3] پژوهه‌ی حذف مبرد R22 را در صنعت تبید کشور سوئد از اویل دهه‌ی 1990 میلادی آغاز نمودند و مبردهای R417a، R407c، R404a و پروپان را در مقایسه با مبرد R22 مورد مطالعه و تحقیق قرار دادند. لی و سو [4] در خلال مطالعه‌ی تجربی، عملکرد سیستم‌های بروتی با مبرد ایزوبوتان را مدل‌نوار قرار داده و نتایج حاصل را با مبردهای R12 و R22 مقایسه کردند.

Please cite this article using:

M. Mafi, M. Shomali, H. Ajorloo, A feasibility study on substitution of environmentally friendly refrigerants in common refrigeration systems, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 779-782, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تبخیر کننده نشان می‌دهد. از آن جا که بازده حجمی با نسبت فشار رابطه عکس دارد، نسبت فشارهای بالاتر، منجر به کاهش بازده حجمی کمپرسور می‌شود. این امر مستلزم جایگزینی کمپرسورهایی با حجم بزرگ‌تر و همچنین لوله‌های با قطر بزرگ‌تر در سیستم است که امر مطلوبی نیست [5]. از آن جایی که برای نسبت فشارهای بالاتر از 8 باید از تراکم دو مرحله‌ای استفاده کرد [10]، مبردهای R134a، ایزوبوتان و R407c در دماهای پایین نیاز به کمپرسور دو مرحله‌ای دارند که هزینه‌های استفاده از این مبردها در چنین سیستم‌هایی را افزایش می‌دهد. با کاهش دما، نسبت فشار تمام مبردها افزایش می‌یابد. مبرد ایزوبوتان بیشترین و مبرد پروپیلن کمترین نسبت فشار را دارا می‌باشد. مبرد پروپان نیز نسبت به مبردهای R12 و R22 دارای نسبت فشار کمتری است.

"شکل 2" تغییرات حجم مخصوص ورودی به کمپرسور را بر حسب دمای تبخیر کننده نشان می‌دهد. این پارامتر از آن جهت تعیین کننده است که حجم مخصوص‌های بالاتر مستلزم استفاده از کمپرسورهای بزرگ‌تر می‌باشد که امر مطلوبی نیست. ایزوبوتان بیشترین و R410a کمترین حجم مخصوص را دارا می‌باشد. مبردهای هیدروکربنی حجم مخصوص بیشتری نسبت به R12 و R22 دارند که لزوم تغییراتی را در چرخه‌های برودتی در صورت استفاده از این مبردها آشکار می‌کنند. مبرد پروپیلن بلا فاصله بالاتر از مبردهای R22، R12، R134a و R407c قرار دارد.

"شکل 3" ویژگی مهم تبرید حجمی را بر حسب دمای تبخیر کننده نشان می‌دهد. تبرید حجمی از تقسیم اختلاف آنتالپی در قسمت خنک کننده بر حجم مخصوص ورودی به کمپرسور به دست می‌آید. مقدار بیشتر این پارامتر

بومزا [5] مبردهای ایزوبوتان، پروپان و آمونیاک را از لحاظ ترمودینامیکی با R22 مقایسه کرد و نتیجه گرفت که آمونیاک و پروپان، به ترتیب، خواص ترمودینامیکی بهتری نسبت به R22 دارند، اما به خاطر سمی بودن آمونیاک، پروپان به عنوان جایگزین مناسب معرفی شد. پادالکار و همکاران [6] جایگزینی مواد هیدروکربنی به جای مبردهای مصنوعی در یک کولر گازی دو تکه به طور عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، عملکرد سیستم کولر گازی مورد اشاره با مبردهای پروپان (R290) و R22 باهم مقایسه شد.

از دیگر زمینه‌های مرتبط به جایگزینی مبردها می‌توان به پمپ‌های گرمایی اشاره کرد. گرانرید [7] ضمن مقایسه خواص ترمودینامیکی چند مبرد هیدروکربنی با مبردهای R12 و R22 نتیجه گرفت که این مبردها می‌توانند جایگزین مناسبی برای مبردهای R12 و R22 در پمپ‌های گرمایی باشند، ولی باید مباحث امنیتی در ارتباط با قابلیت اشتغال این مبردها نیز در نظر گرفته شود.

در این تحقیق مبردهای هیدروکربنی پروپیلن (R1270)، پروپان (R290) و ایزوبوتان (R600a) به علت در دسترس بودن در داخل کشور انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین مبردهای R410A و R407C به خاطر خواص ترمودینامیکی مناسب و گسترش روزافزون به کارگیری آنان در سیستم‌های برودتی مدنظر قرار گرفته‌اند. در ادامه ابتدا مشخصات و شرایط عملیاتی دو چرخه‌ی واقعی تبرید تراکمی ساده مورد استفاده در سیستم‌های تبرید متداول صنعتی و همچنین پمپ گرمایی تشریح می‌شوند و سپس، پارامترهای ترمودینامیکی و فنی موثر بر چرخه‌های مذکور با استفاده از مبردهای مذکور، استخراج و باهم مقایسه می‌شوند.

2- مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی دقیق‌تر جایگاه مبردهای مختلف در صنعت تبرید، در این تحقیق چرخه‌های تبرید متداول صنعتی و پمپ گرمایی، به عنوان مطالعات موردی، انتخاب شده است. به‌منظور شبیه‌سازی چرخه‌های فوق الذکر، از نرم‌افزار کول-پک [8] استفاده شده است.

در ادامه، مشخصات و شرایط هریک از چرخه‌ها تشریح شده و سپس با شبیه‌سازی آنان در نرم‌افزار مذکور، پارامترهای موثر بر عملکرد ترمودینامیکی و فنی آنان با استفاده از مبردهای مختلف، استخراج و باهم مقایسه شده‌اند.

2-1- مطالعه موردی الف - سیستم تبرید متداول صنعتی

در این بخش با استفاده از مدل‌سازی یک سیستم تبرید تراکمی متداول واقعی، به بررسی جایگزینی مبردهای هیدروکربنی در صنعت می‌پردازیم.

2-1-1- مشخصات و شرایط عملیاتی پایه‌ی چرخه

مشخصات پایه چرخه تبرید تراکمی متداول در نظر گرفته شده در این تحقیق، به صورت ذیل می‌باشد [9]: دمای تبخیر کننده: -20°C ، میزان مأوفوق داغ شدن: 8°C ، افت فشار در تبخیر کننده: 0.2 atm، افت فشار در خط 3.5°C: 0.1 atm، افت فشار در خط تخلیه: 0.2 atm، دمای چگالند: 0.01 atm، دمای مادون سرد شدن: 2°C ، افت فشار در کندانسور: 0.1 atm، افت فشار در خط مایع: 0.01 atm، بازده آیزنتروبیک کمپرسور: 70%， تلفات حرارتی در کمپرسور: 15% توان مصرفی، ظرفیت سرمایش: 100kW.

2-1-2- مقایسه ترمودینامیکی و فنی

"شکل 1" تغییرات نسبت فشار مبردها را بر حسب دماهای مختلف

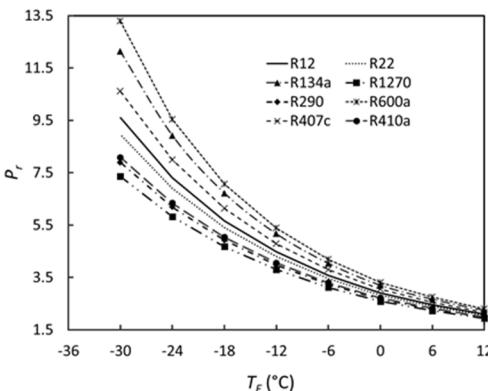


Fig. 1 Compressor relative pressure in terms of evaporation temperature

شکل 1 تغییرات نسبت فشار کمپرسور بر حسب دمای تبخیر

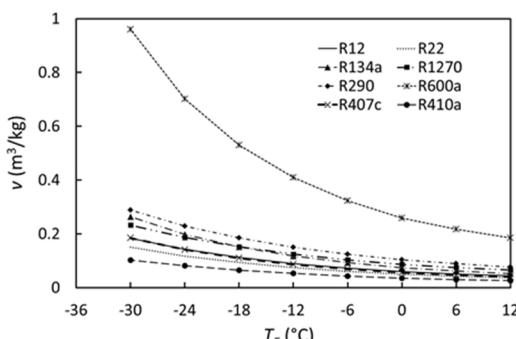


Fig. 2 Input compressor specific volume in terms of evaporation temperature

شکل 2 تغییرات حجم مخصوص ورودی به کمپرسور بر حسب دمای تبخیر

بنابراین دمای چگالنده با توجه به شرایط اقلیم کشور، در بازه 45 تا 60 درجه‌ی سلسیوس در نظر گرفته می‌شود و تغییرات بقیه‌ی خواص ترمودینامیکی و فنی چرخه نسبت به این بازه تغییرات، بررسی می‌شود. برای تأمین آب سرد موردنیاز سرمایش با دمای 5 درجه‌ی سلسیوس، دمای تبخیر مبرد در تبخیرکننده حدود 5-5 درجه‌ی سلسیوس می‌باشد [10,9]. سایر خصوصیات چرخه تراکمی پایه‌ی مذکور به صورت زیر است [9]: میزان موفق داغ شدن: 5°C، میزان مادون سرد شدن: 2°C، افت فشار در خط مکش: 0.5atm، افت فشار در خط تخلیه: 0.5atm، بازده آبزنتروپیک کمپرسورها: 70%， تلفات حرارتی در کمپرسور: 10% توان مصرفی و ظرفیت سرمایش: 100kW.

2-2- مقایسه‌ی ترمودینامیکی و فنی

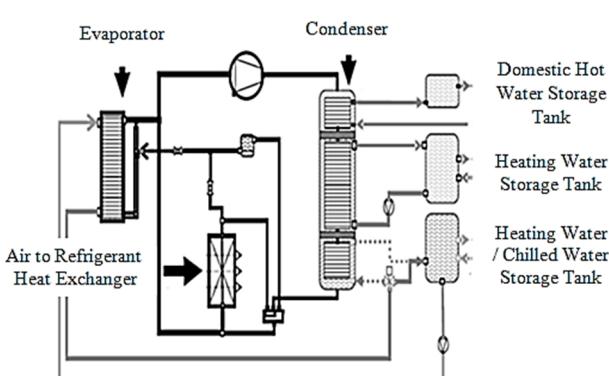
"شکل 5" تغییرات دمای تخلیه‌ی کمپرسور را بر حسب دمای چگالش نشان می‌دهد. مبرد R22 دارای بالاترین دمای تخلیه است. دمای تخلیه‌ی پایین نیز از جهاتی مطلوب نیست؛ زیرا برای تأمین آب گرم بهداشتی 60 درجه‌ی سلسیوس نیاز به دمایی بالاتر از 70 درجه‌ی سلسیوس در خروجی کمپرسور وجود دارد. مبردهای هیدروریزین ایزوپوتان و پروپان کمترین دمای تخلیه را دارا می‌باشند. در صورت انتخاب این مبردها به عنوان سیال عامل چرخه پمپ گرمایی، نیاز به تجهیزات جانبی برای تأمین بخشی از گرمایش موردنیاز ساختمان وجود دارد. شرایط مبرد پروپیلن بهتر است و دارای دمای تخلیه بالاتر از 70 درجه‌ی سلسیوس در تمامی گستره دمای چگالش مدنظر است.

تغییرات نسبت فشار کمپرسور برای مبردهای مختلف بر حسب دمای چگالش در "شکل 6" نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش دمای چگالش، نسبت فشار تمامی مبردها افزایش می‌یابد. مبرد R134a بالاترین نسبت فشار و بدترین عملکرد را دارد. مبرد پروپیلن نیز دارای کمترین نسبت فشار است.

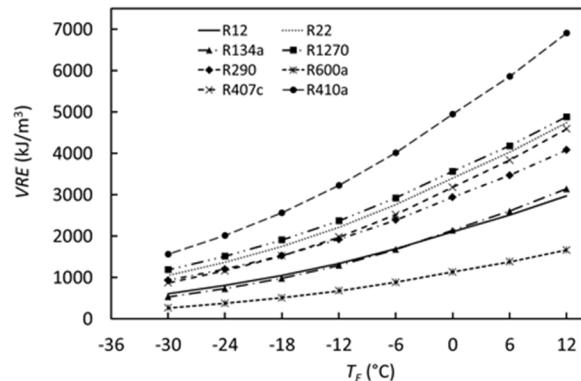
"شکل 7" تغییرات تبريد حجمی را بر حسب دمای چگالش چرخه نشان می‌دهد. مبرد R410a بیشترین ظرفیت تبريد حجمی را دارا می‌باشد و ایزوپوتان، کمترین ظرفیت تبريد حجمی را دارد.

3- نتیجه‌گیری

از مقایسه‌های بخش‌های قبل می‌توان مبرد مناسب را به عنوان جایگزین مبردهای مصنوعی معرفی نمود. مبرد ایزوپوتان دارای کمترین ضریب تبريد حجمی است اما دمای تبخیر آن در فشار اتمسفریک حدود 12°C است. به همین دلیل استفاده از این مبرد در فشارهای پایین‌تر از فشار اتمسفریک، به



شکل 4 طرح واره چرخه پمپ گرمایی در تحقیق حاضر



شکل 3 تغییرات ظرفیت تبريد حجمی کمپرسور بر حسب دمای تبخیر

بیانگر آن است که به ازای حجم مشخصی از مبرد، سیستم قادر به تولید سرمای بیشتری می‌باشد که امری مطلوب است؛ بنابراین این پارامتر یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش عملکرد مناسب مبرد در چرخه است.

2-2- مطالعه‌ی موردی ب - پمپ گرمایی

در این قسمت به مطالعه امکان جایگزینی مبردها در پمپ گرمایی می‌پردازیم، شماتیک پمپ گرمایی در "شکل 4" نشان داده شده است. این دستگاه با جایه‌جایی وضعیت چگالنده و تبخیرکننده، امکان تأمین گرمایش و سرمایش را در یک دستگاه فراهم می‌آورد. نحوه کارکرد پمپ گرمایی نشان داده شده در "شکل 4" در فصل زمستان بدین صورت است که مبدل گرمایی هواخنک به عنوان تبخیرکننده اصلی عمل می‌کند و هر سه قسمت چگالنده در مدار هستند. با کار کردن سیستم، بدليل قرار گرفتن تبخیرکننده هوایی در فضای بیرون و برفک گرفتن آن، نیاز به برفک‌زدایی خواهد بود. در این حالت فن تبخیرکننده هوایی خاموش شده، قسمت انتهایی چگالنده از مدار خارج و تبخیرکننده آب نمکی وارد مدار می‌شود و سرمای خود را با آب گرم ذخیره شده در محفظه انتهایی چگالنده (به عنوان جایگزین هوای بیرون) تبادل نموده و دمای آن را از 15 درجه‌ی سلسیوس به 5 درجه‌ی سلسیوس کاهش خواهد داد. در این فاصله زمانی، مبرد داغ پس از خروج از قسمت دوم چگالنده با دمای حدود 30 درجه‌ی سلسیوس به سمت تبخیرکننده هوایی هدایت شده و ضمن تبادل حرارت، عملیات برفک‌زدایی بدون ایجاد وقفه در کارکرد پمپ گرمایی انجام خواهد شد. پس از رسیدن دمای محفظه انتهایی چگالنده به حد مجاز پایین (5 درجه‌ی سلسیوس)، مبدل گرمایی هوایی و قسمت انتهایی چگالنده وارد مدار شده و تبخیرکننده آب نمکی از مدار خارج خواهد شد. در فصل تابستان، تبخیرکننده آب نمکی، به منظور تأمین آب سرد موردنیاز سرمایش ساختمان، وارد مدار شده و قسمت بالای چگالنده آبی (جهت تأمین آب گرم بهداشتی) به همراه مبدل گرمایی هوایی، نقش چگالنده‌های سیستم را خواهند داشت.

2-2- مشخصات و شرایط عملیاتی پایه چرخه

وضعیت در نظر گرفته شده برای پمپ گرمایی در این پژوهش، سرمایش (تابستان) است. در شرایط سرمایش (تابستان)، چگالنده با هوای در تبادل گرمایی است که بسته به شرایط آب و هوایی شهرهای مختلف، دارای دمایی متفاوتی است. معمولاً دمای تقطیر چگالنده، به جهت تبادل حرارت مناسب، 15 درجه‌ی سلسیوس بالاتر از دمای طرح بیرون در نظر گرفته می‌شود [10].

کمتری نسبت به مبردهای R410a و پروپیلن دارا می‌باشند. مبرد R410a نیز علی‌رغم داشتن عملکرد خوب در زمینه‌ی اثر تبريد حجمی، در زمینه‌ی تامین الزامات فنی مرتبط با کمپرسور رتبه‌ای پایین‌تر از پروپیلن دارد. بنابراین مبرد پروپیلن (R1270) به‌خاطر دبی جرمی و نسبت فشار بسیار پایین در کمپرسور و مقادیر مناسب در سایر پارامترها، به‌عنوان مبرد جایگزین مبردهای مصنوعی در سیستم‌های مورد مطالعه در این تحقیق، معروفی می‌گردد. استفاده از ماده‌ی پروپیلن (پروپین) به‌عنوان مبرد، علی‌الخصوص به‌عنوان جایگزین R22، در تحقیقات پیشین نیز توصیه شده است [11].

4- فهرست علائم

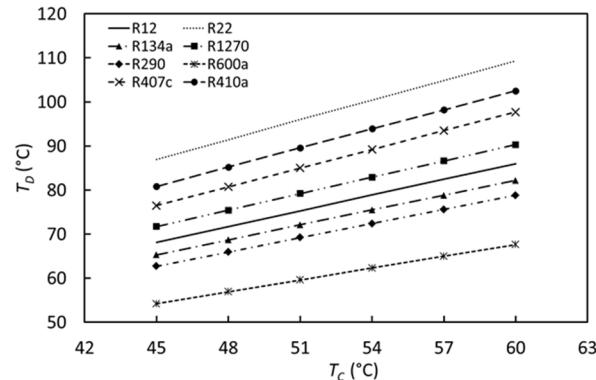
| | |
|---|-------|
| کلروفلوئوروکربن | CFC |
| ضریب عملکرد سیستم | COP |
| هیدروکلروفلوئوروکربن | HCFC |
| هیدروفلوئوروکربن | HFC |
| نسبت فشار کمپرسور | P_r |
| دماهی چگالنده (°C) | T_c |
| دماهی خروجی از کمپرسور (°C) | T_d |
| دماهی تبخیرکننده (°C) | T_e |
| حجم مخصوص (kg^{-1}m^3) | v |
| ظرفیت تبريد حجمی (kJm^{-3}) | VRE |

5- تقدیر و تشکر

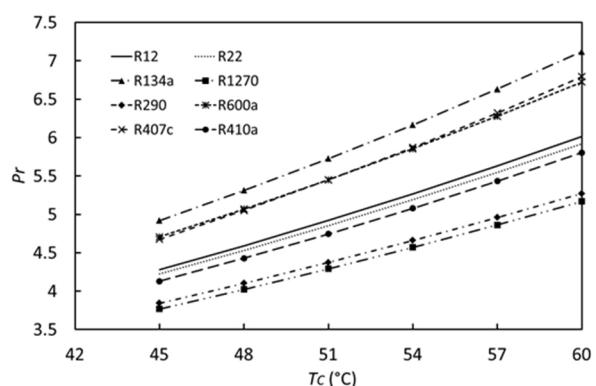
این اثر با حمایت مالی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است.

6- مراجع

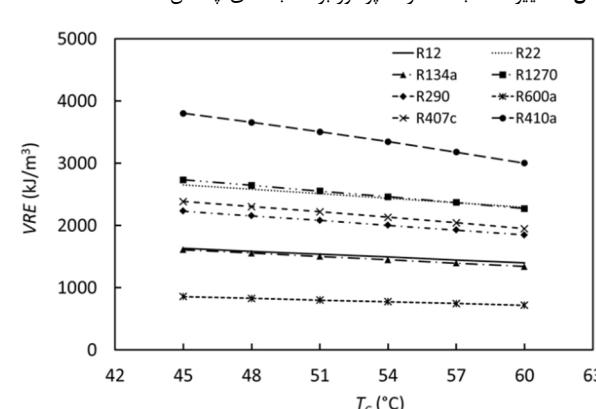
- [1] S. Benhadid-Dib, A. Benzaoui, Refrigerants and their environmental impact Substitution of hydro chlorofluorocarbon HCFC and HFC hydro fluorocarbon. Search for an adequate refrigerant, *Energy Procedia*, Vol. 18, pp. 807–816, 2012.
- [2] S. Jia, *Evaluation of HCFC Alternative Refrigerants*, Heatcraft Worldwide Refrigeration, United States, pp. 1-5, 2008.
- [3] A. Johansson, *Phase out of refrigerant R22*, PhD Thesis, Department of Energy Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.
- [4] Y. S. Lee, C.C. Su, Experimental studies of isobutane (R600a) as the refrigerant in domestic refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 507–519, 2002.
- [5] M. Boumaza, Performances assessment of natural refrigerants as substitutes to CFC and HCFC in hot climate, *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 125-130, 2010.
- [6] A. S. Padalkar, K. V. Mali, S. Devotta, Simulated and experimental performance of split packaged air conditioner using refrigerant HC-290 as a substitute for HCFC-22, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 62, No. 1, pp. 277-284, 2014.
- [7] E. Granryd, Hydrocarbons as refrigerants- an overview, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 1, pp. 15-24, 2001.
- [8] CoolPack Software, IPU & Department of Mechanical Engineering of Technical University of Denmark, 2012.
- [9] S. M. Mousavi Naeinian, M. Mafi, *Simulation Tools of Refrigeration Systems (CoolPack)*, pp. 23-26, Tehran: K. N. Toosi University of Technology Publication, 2012. (in Persian)
- [10] S. K. Wang, *Handbook of Air conditioning and refrigeration*, Second Edition, pp.11.2-11.6 , New York: McGraw-Hill, 2001.
- [11] B. Palm, Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems- a review, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, No. 4, pp. 552-563, 2008.



شکل ۵ تغییرات دماهی تخلیه‌ی کمپرسور بر حسب دماهی چگالش



شکل ۶ تغییرات نسبت فشار کمپرسور بر حسب دماهی چگالش



شکل ۷ تغییرات ظرفیت تبريد حجمی کمپرسور بر حسب دماهی چگالش

لحاظ فنی (نشت احتمالی هوا به درون تبخیرکننده) نیازمند طراحی خاص است که به لحاظ اقتصادی مقرر به صرفه نیست. دو مبرد R134a و R407c به خاطر نسبت فشار بالای کمپرسور در دماهای پایین، نیاز به تراکم دو مرحله‌ای دارند که این امر هزینه‌ی اولیه سیستم را بهشت افزایش می‌دهد. مبرد R12 دارای بیشترین دبی جرمی و کمترین ضریب عملکرد و نیز ظرفیت تبريد حجمی کمی می‌باشد. از میان مبردهای باقیمانده، مبرد R22 و پروپان در تامین الزامات فنی مرتبط با کمپرسور، شامل نسبت فشار، دماهی تخلیه و حجم مخصوص ورودی به کمپرسور، مطابقت